XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E PERDA DE CARGA DE NANOTUBOS DE CARBONO DISPERSOS EM ÁGUA E ETILENO-GLICOL

Abdul Orlando Cárdenas Gómez; Daniel Alberto Florez; Luz Elena Peñaranda Chenche; Enio Pedone Bandarra Filho
Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

RESUMO

O presente trabalho trata de um estudo experimental da transferência de calor e perda de pressão de nanofluidos em escoamento monofásico no interior de tubos. Tais nanofluidos foram produzidos com base em uma mistura água e etileno glicol (H_2O:EG 50:50 wt%). As nanopartículas utilizadas foram nanotubos de carbono de multipla parede. Uma bancada experimental foi construída e devidamente instrumentada para satisfazer as condições nominais de ensaio estabelecidas. O fluxo de calor uniforme aplicado à superfície do tubo variou entre 10 e 18 kW/m^2, a vazão mássica entre 20 e 80 g/s. A temperatura de entrada na seção de testes foi mantida constante em 15 °C e 25 °C. As propriedades termofísicas dos nanofluidos, condutividade térmica, viscosidade e massa especifica foram medidas experimentalmente e seus valores utilizados para a análise da transferência de calor. Em geral, o coeficiente de transferência de calor para nanofluidos apresentou incrementos significativos em comparação ao fluido base. Já os resultados para a queda de pressão de nanofluidos não apresentaram diferenças significativas quando comparados ao fluido base.

Palavras-chave: Nanofluidos, nanopartículas, coeficiente de transferência de calor, queda de pressão, condutividade térmica, viscosidade.

ABSTRACT

The present paper focus on the experimental study of heat transfer and pressure drop of carbon nanotubes dispersed in a solution of water and ethylene-glycol (50:50 wt%). An experimental facility was built and very well instrumented to conduct tests in previous established conditions. The uniform heat flux applied to the surface varied from 10 and 18 kW/m^2, the mass flow rate from 20 and 80 g/s. The inlet temperature at the test section was maintained constant in 15 °C and 25 °C. The thermophysical properties of nanofluids such as, thermal conductivity, viscosity and density were experimentally measured and its values were used to the heat transfer analysis. In general, the heat transfer coefficient for nanofluids presented significant increments in comparison to the base fluid. Related to the pressure drop results for nanofluids, it is important to highlight that the values were slightly higher than the base fluid.

Keywords: Nanofluids, nanoparticle, heat transfer coefficient, pressure drop, thermal conductivity, viscosity.

1 INTRODUÇÃO

A obtenção de sistemas energeticamente eficientes, é um dos desafios científicos mais importantes para o desenvolvimento tecnológico dos processos industriais que se aplicam em diversas áreas como, por exemplo, a

indústria aeroespacial, automotiva, telecomunicações, manufatura de grande escala, eletrônica ou naval entre outras. O desenvolvimento e a evolução da tecnologia associado com o gerenciamento energético das fontes renováveis e não renováveis de energia, exigiu métodos mais eficientes de transferência de calor (SAJID e ALI, 2019). Nesse sentido, todos os processos que envolvem a transferência de calor como meio de gerenciamento energético, apresentam uma tendência crescente de pesquisa para o desenvolvimento de novas aplicação que possibilitem o aumento de eficiência energética.

O avanço da ciência, tecnologia e o advento da nanotecnologia, possibilitou a eventual chance de sintetizar materiais na escala nanométrica. Como consequência, novas iniciativas surgiram visando intensificar as propriedades térmicas dos fluidos de trabalho com a adição de partículas solidas em escala nanométricas. Este conceito foi denominado de "Nanofluidos" por Choi (1995). Nas últimas duas décadas, os nanofluidos foram idealizados como uma nova geração de fluidos e foram propostos como um candidato ideal para aumentar a transferência de calor quando comparados com fluidos térmicos convencionais. Entretanto, mesmo sendo uma área recentemente estudada, encontra-se um crescente número de publicações que analisam caraterísticas como a produção, caracterização de propriedades e o desempenho termo-hidráulico dos diferentes tipos de nanofluidos, visando uma aplicação desta nova classe de fluidos de trabalho. No entanto, a discussão e divergência dos resultados presentes na literatura, independentemente do método de avaliação utilizado (analítico, numérico ou experimental) dificultam e limitam a capacidade de consenso dos grupos de pesquisa do mundo todo.

Com base nos argumentos mencionados anteriormente, o presente trabalho pretende avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubo de carbono múltipla parede a base de uma mistura água e etileno glicol (H_2O:EG 50:50 wt%) em escoamentos sem mudança de fase no interior de tubos horizontais, a fim determinar sua possível aplicabilidade em processos que envolvam transferência de calor.

2 PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS

Para produzir os nanofluidos a base de misturas água e etileno glicol (H_2O:EG 50:50 wt%), estabeleceu-se uma rotina descrita na Fig. 1, definida previamente, que foi igualmente aplicada na síntese de todas as amostras. Foram utilizadas nanopartículas a base de carbono (Nanotubos de carbono), com diferente tamanho de nanopartículas como pode ser observado na Tab. 1.

Portanto, as amostras de nanofluido produzido foram resultado de um processo de dispersão, sonicação e homogeneização de nanopartículas de uma solução funcionalizada de alta concentração em massa de nanopartículas. As soluções funcionalizadas de alta concentração a base de água foram fornecidas pela Nanostructures & Amorphous Material, onde as

propriedades físicas (massa específica, e o calor específico) e as características geométricas e morfológicas das nanopartículas foram fornecidas pelo fabricante.

Figura 1 – Processo de produção de nanofluidos

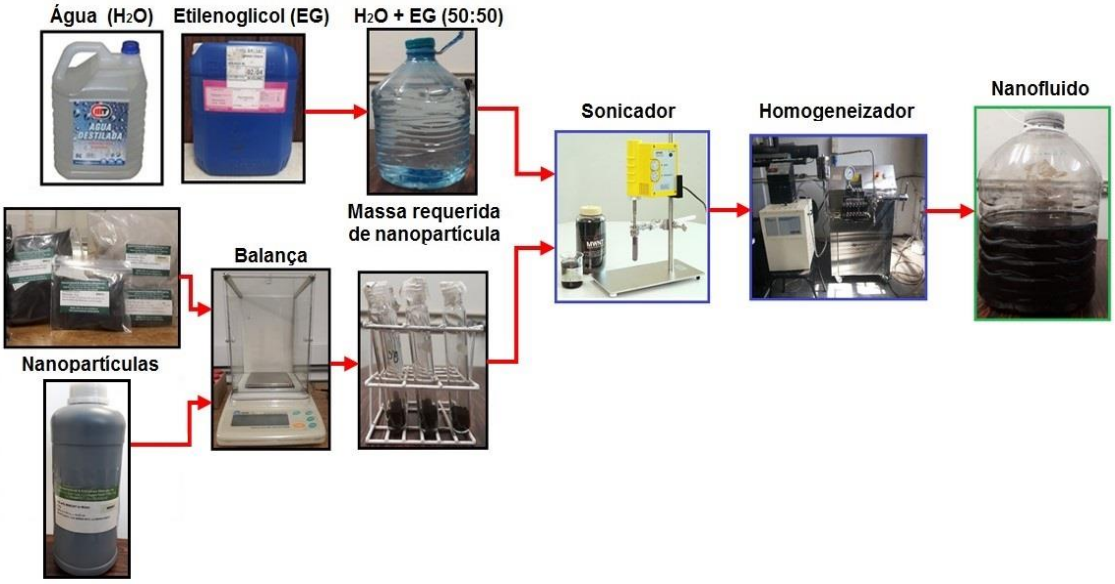


Tabela 1 – Características das nanopartículas utilizadas na produção de nanofluido.

Nanopartículas	Nome dado	Morfologia	d [nm]	L [μm]	ρ_{np} [g/cm³]	Cp_{np} [kJ/kgK]
MWCNT	CNT_800	Nanotubo	20-30	10-30	2,1	0,71
MWCNT	CNT_300	Nanotubo	>50	10-20	2,1	0,71

No total foram produzidas 8 amostras de nanofluido a base de (H_2O:EG 50:50 wt%), como é descrito na Tab. 2. Foi previamente estabelecido um volume final de 3500 ml, já que um volume 2500 ml é requerido para a realização dos testes da avaliação do desempenho termo-hidráulico na bancada experimental, enquanto o restante foi utilizado para realizar medição das propriedades como viscosidade e condutividade térmica.

Tabela 2 – Descrição das amostras de nanofluido produzidos.

Nome da amostra	Nanopartícula /diâmetro [nm]	Fluido de base	[% Vol.] ϕ	[% massa] wt
CNT_300_1	MWCNT/~50	H_2O:EG 50:50 wt%	0,001	0,0019
CNT_300_2	MWCNT/~50	H_2O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0098
CNT_300_3	MWCNT/~50	H_2O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0197
CNT_300_4	MWCNT/~50	H_2O:EG 50:50 wt%	0,050	0,0988
CNT_800_1	MWCNT/[20-30]	H_2O:EG 50:50 wt%	0,001	0,0019
CNT_800_2	MWCNT/[20-30]	H_2O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0098
CNT_800_3	MWCNT/[20-30]	H_2O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0197
CNT_800_4	MWCNT/[20-30]	H_2O:EG 50:50 wt%	0,050	0,0988

3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS

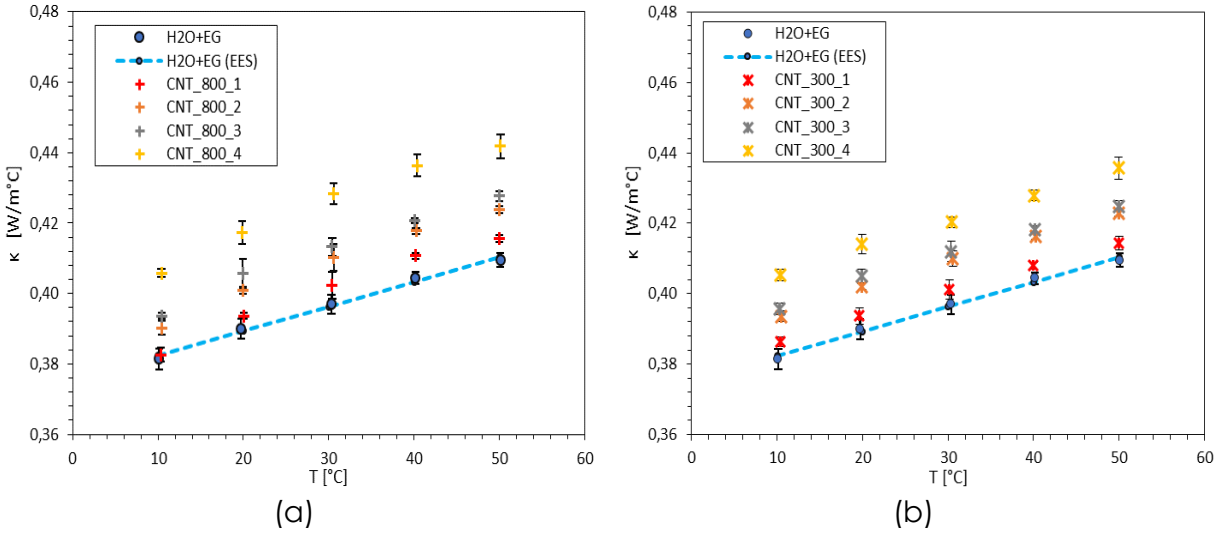
A etapa de caracterização das propriedades termofísicas dos nanofluidos é um processo que foi realizado simultaneamente com outras etapas do trabalho. Uma vez preparadas as amostras de nanofluidos, foram caracterizadas para determinar suas propriedades termofísicas com os equipamentos que possui o laboratório LEST-nano. Principalmente foram medidas e avaliadas experimentalmente a massa específica, a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica de todas as amostras produzidas.

3.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é medida por intermédio de um analisador de propriedades térmicas adquirida da Linseis (THB1 - Transient Hot Bridge). As medições de condutividade térmica para as amostras de fluido foram realizadas em uma faixa de temperatura compreendida entre 10 e 60°C com incrementos de 10 °C. Para cada valor de temperatura são realizadas 20 medições. Portanto, os valores apresentados da condutividade térmica para cada valor de temperatura são resultado de um média aritmética das 20 medições realizadas.

A Fig. 2, mostra os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluidos de nanotubo de carbono (CNT) e do fluido base em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições.

Figura 2 – Condutividade térmica dos nanofluidos de Nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) CNT com razão de aspecto r=800. (b) CNT com razão de aspecto r=300.



Portanto, na Fig. 2a pode ser observado que os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=800), foram em média 1,1%, 3,5%,

3,9% e 7,4% para as amostras CNT_800_1, CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4 respetivamente. Na Fig. 4.4b pode ser observado os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=300) foram em média 1,0%, 3,1%, 3,7% e 6,1% para as amostras CNT_300_1, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4 respetivamente.

Como era de se esperar, a condutividade dos nanofluidos de nanotubo de carbono (CNT_300 e CNT_800) mostraram uma tendência de aumentou como a adição de nanopartículas. No entanto, os incrementos foram minimamente superiores nas amostras de nanofluido com nanopartículas de maior razão de aspecto (CNT_800). Este comportamento foi mais evidente na amostra de maior concentração de nanopartículas (CNT_800_4), já que, quando comparada com a amostra de nanofluido da mesma concentração e menor razão de aspecto (CNT_800_4), o aumento da condutividade térmica foi superior em 1,6%. Esta diferença na condutividade é explicada pelo fato que as nanopartículas que possuem menor diâmetro apresentam uma área especifica maior. Portanto, uma maior área especifica, significa que existem mais moléculas de líquido próximas da superfície das nanopartículas de nanotubo de carbono, mesmo que as amostras apresentarem igual concentração. Estas moléculas de líquido podem formar uma estrutura de camada, chamada por (YU, RICHTER, et al., 2000) de camada interfacial e que segundo Jiang, (JIANG, DING e PENG, 2009), pode aumentar a condutividade térmica do nanofluido.

3.2 Viscosidade

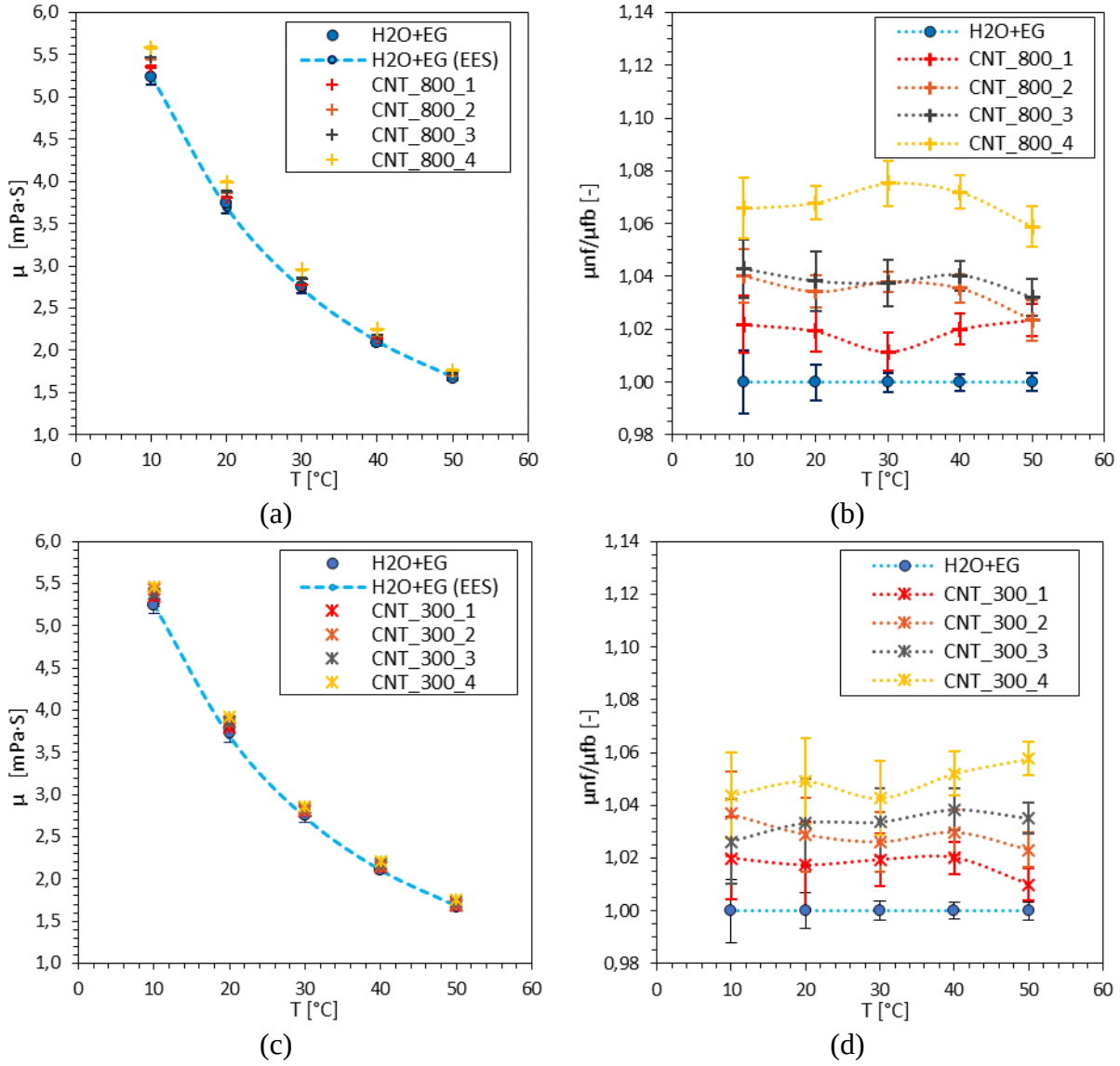
A viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido e do fluido base foram determinadas com o auxílio do viscosímetro fabricado pelo Anton Paar (Modelo Stabinger™ SVM™ 3000). O princípio físico para determinar a viscosidade é baseado no escoamento entre placas planas paralelas e infinitas.

A Fig. 3 apresenta os resultados experimentais da viscosidade dinâmica e a viscosidade relativa das diferentes amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300) em função das temperaturas nas quais foram realizadas as medições. Nesse sentido, as Figs. 3a e 3c mostram especificamente os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido CNT_800 e CNT_300, respetivamente, onde pode ser observado que as amostras de nanofluido apresentaram valores superiores de viscosidade dinâmica quando comparado com o fluido base. Isto pode ser visto em detalhe, nas Figs. 3b e 3d que mostram os resultados da viscosidade relativa das amostras de nanofluido CNT_800 e CNT_300 respetivamente em função da temperatura do fluido, usando como referência a viscosidade dinâmica do fluido base (H_2O:EG 50:50 wt%).

Portanto, na Fig. 3b pode ser observado que os incrementos obtidos da viscosidade nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=800), foram em média 1,9%, 3,4%, 3,8% e 6,8% para

as amostras CNT_800_1, CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respetivamente. Na Fig. 3d os incrementos obtidos da viscosidade nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=300), foram em média 1,7%, 2,9%, 3,3% e 4,9% para as amostras CNT_300_1, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respetivamente.

Figura 3 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica, CNT_800. (b) Viscosidade relativa, CNT_800. (c) Viscosidade dinâmica, CNT_300. (d) Viscosidade relativa, CNT_300.

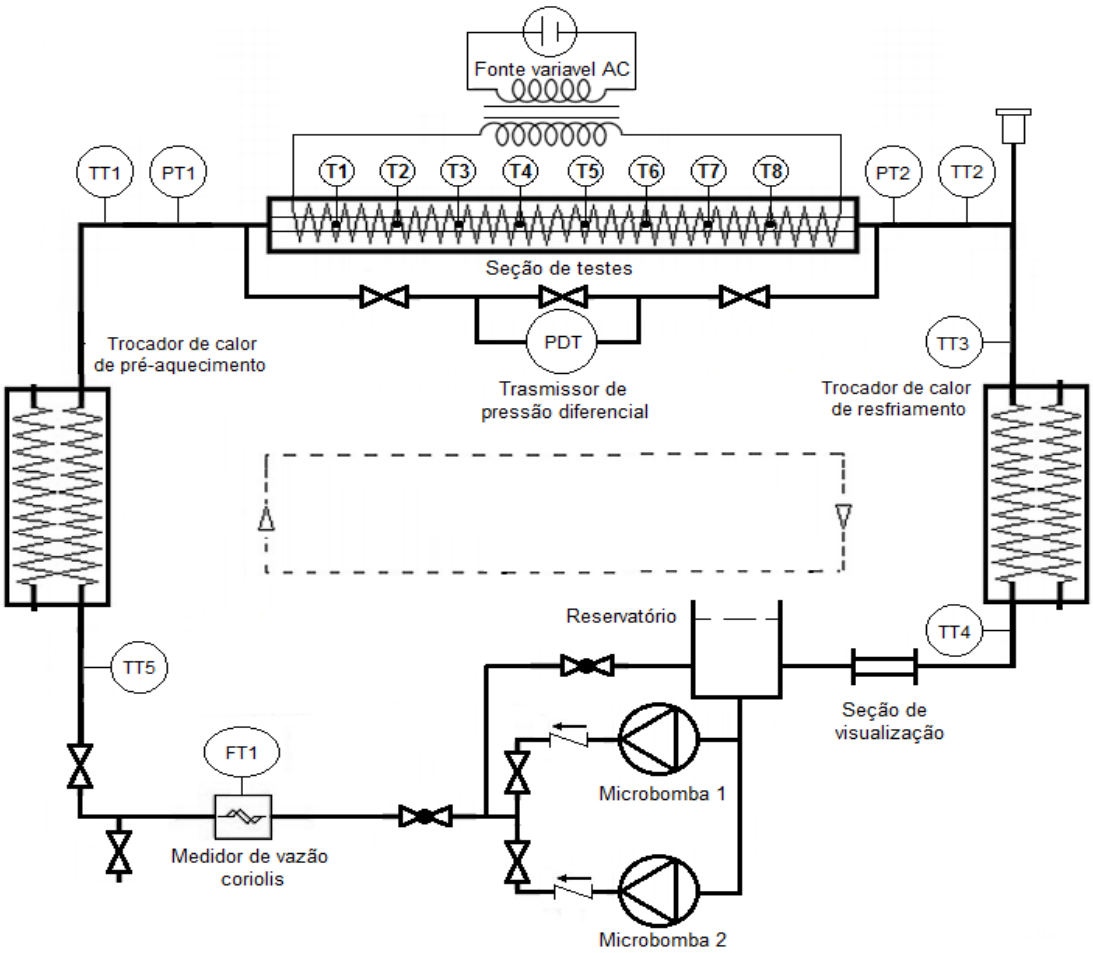


As Figs. 3b e 3d mostras que existe uma tendência do tamanho da nanopartícula no incruento da viscosidade do nanofluido, já que as amostras de nanofluidos de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=800) apresentaram maiores incrementos de viscosidade quando comparados com as amostras de nanofluidos de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=300). Este comportamento é mais evidente nas amostras de maior concentração de cada tipo de nanofluido (CNT_800_4 e CNT_300_4) cujos incrementos na viscosidade foram 6,8% e 4,9%, respetivamente.

4 BANCADA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMO-HIDRÁULICO

A bancada experimental utilizada para determinar o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga possui os atributos necessários para originar as condições fluidodinâmicas e térmicas necessárias a fim de obedecer às hipóteses e exigências teoricamente estabelecidas para a solução do problema em questão. Assim, a Fig. 3.13, apresenta o diagrama esquematizado da bancada experimental, disponível no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LEST-nano que é constituída por: a seção de testes, o sistema de refrigeração, o sistema de escoamento e medição de vazão mássica, o sistema de preaquecimento e o sistema de monitoramento e aquisição de dados.

Figura 4 - Diagrama esquematizado da bancada experimental.



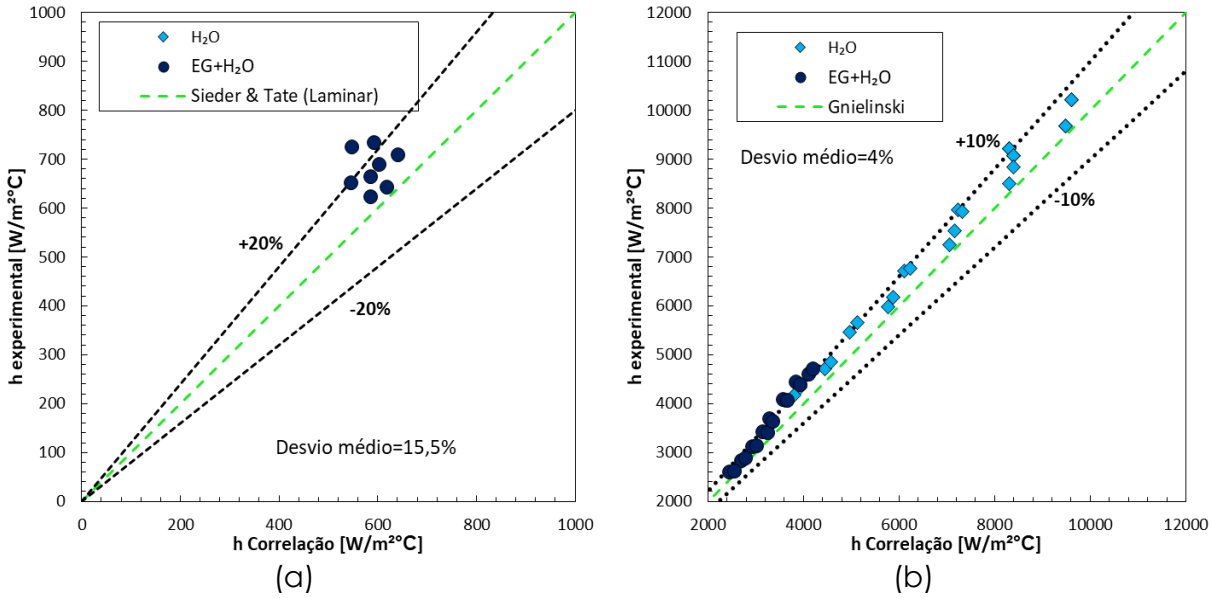
O procedimento experimental e a análise dos dados obtidos da bancada, foram inicialmente validados utilizando água destilada e mistura de água destilada etileno glicol (H_2O:EG 50:50 wt%) como fluidos de testes, já que existe na literatura informação consolidada que descreve seu comportamento termo-hidráulico. Em vista disso, os resultados médios obtidos para o coeficiente de transferência de calor dos fluidos de teste, foram comparados com modelos clássicos de transferência de calor de (SIEDER e TATE, 1936) e Gnielinski (1975) descritos

pelas Eqs. 1 e 2 para escoamento em regime laminar e turbulento respetivamente, como pode ser visto na Fig. 5.

$$Nu = 1{,}86 \cdot \left[\left(\frac{D}{L} \right) \cdot \mathrm{Re}_D \cdot \mathrm{Pr} \right]^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0{,}14} \tag{1}$$

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot (\mathrm{Re} - 1000) \cdot \mathrm{Pr}}{1 + 12{,}7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot \left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)} \tag{2}$$

Figura 5 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente versus modelo clássico (a) SIEDER e TATE, 1936 (b)Gnielinski (1975).



Portanto pode ser verificado pela Fig. 5 que existe uma boa concordância entre os resultados da validação do coeficiente de transferência de calor por convecção no equipamento experimental e os modelos utilizados para predizer o coeficiente de transferência de calor para escoamento monofásico em regime turbulento no interior de tubos.

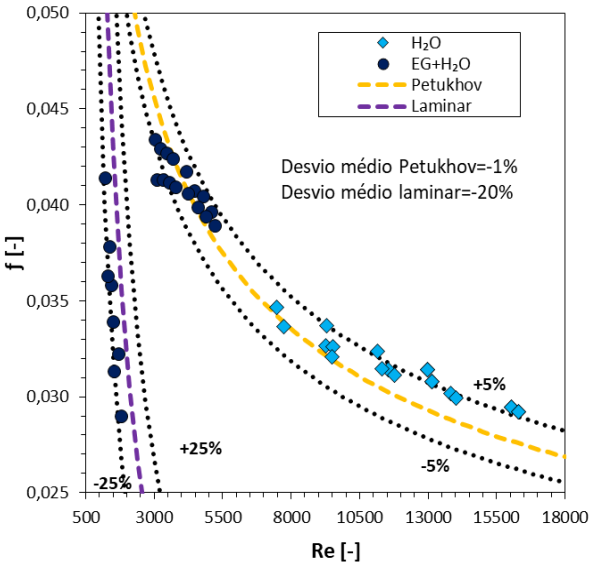
Da mesma forma, os resultados da queda de pressão, foram comparados com o modelo analítico para regime laminar descrito na Eq. 3, onde o escoamento está completamente desenvolvido hidrodinamicamente com perfil de velocidade parabólico, também conhecido como a distribuição de Hagen-Poiseuille. Os resultados também foram comparados em regime turbulento com o modelo de Petukhov (1970) descrito pela Eq. 4,

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}} \tag{3}$$

$$f = (0{,}79\ln(\mathrm{Re}) - 1{,}64)^{-2} \quad (4)$$

Assim, o desvio médio obtido em regime laminar foi de -20%. Em regime turbulento a comparação entre os resultados experimentais e o modelo de Petukhov apresentou um desvio médio de -1%, como pode ser observado na Fig. 6,

Figura 6 – Validação dos resultados obtidos do fator de atrito em função do número de Reynolds.

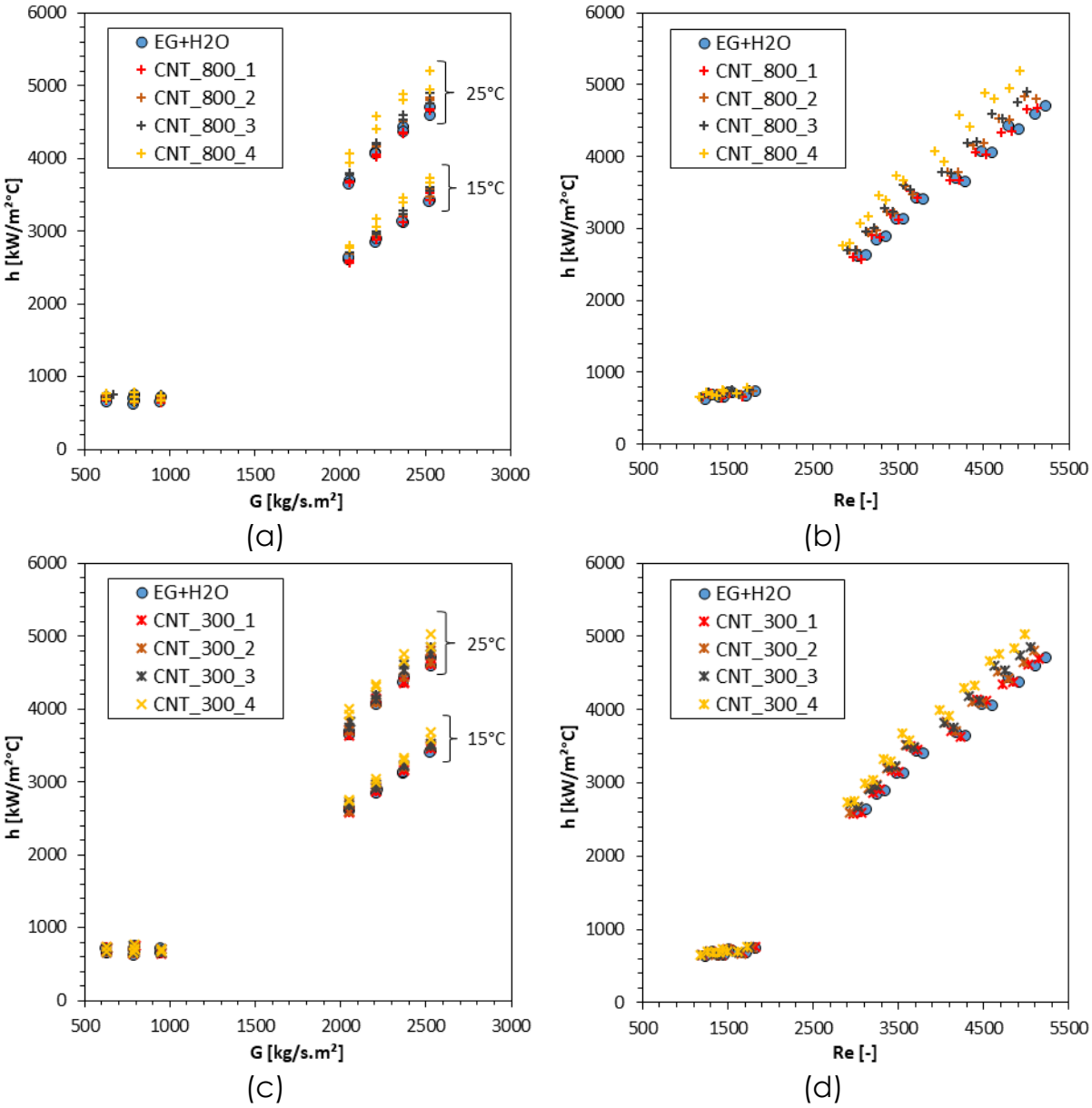


5 RESULTADOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

As Figs. 7a e 47c apresentam os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção, em função da variação da velocidade mássica, para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 e CNT_300 a base da mistura de (H_2O:EG 50:50 wt%). Conforme, os resultados experimentais ilustrados na Fig.7a, foi observado que os incrementos no coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento, na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=800), quando comparado ao fluido base (H_2O:EG 50:50 wt%), foram em média de, 3,3%, 4,1% e 8,3%, para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respetivamente.

Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste os incrementos foram em média de 3,2%, 3,6%, e 9,7%, para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respetivamente. A amostra CNT_800_1 não apresentou aumento no coeficiente de transferência de calor nas duas temperaturas de entrada que foram realizados os testes.

Figura 7 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) CNT_800 $(h_{exp}\ x\ G)$. (b) CNT_800 $(h_{exp}\ x\ Re)$. (c) CNT_300 $(h_{exp}\ x\ G)$. (d) CNT_300 $(h_{exp}\ x\ Re)$.



Na Fig. 7c, os incrementos no coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=300), foram em média de, 2,2%, 2,8% e 5,7%, para as amostras CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respetivamente. Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste, os incrementos foram em média de, 1,9%, 3,2% e 6,9%, para as amostras, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respetivamente. A amostra CNT_300_1, também não apresentou aumento no coeficiente de transferência de calor nas duas temperaturas de entrada que foram realizados os testes. Assim, de acordo com as Figs. 7a e 7c não foi observado um efeito da temperatura no incremento relativo do coeficiente de transferência de calor para as amostras de nanofluido de nanotubo CNT_800 e CNT_300, nas condições nominais que foram realizados os testes.

As Fig. 7b e 7d apresentam os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds, Re, para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 e CNT_300 a base da mistura de (H_2O:EG 50:50 wt%). Portanto, os resultados experimentais apresentados na Fig. 7b mostraram que em regime laminar, nas amostras de nanofluido CNT_800 o coeficiente de transferência de calor médio quando comparado com o fluido base, aumentou em média, 2,3%, 2,8% e 3,1% para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respetivamente. Em regime turbulento, os aumentos do coeficiente de transferência de calor, foram em média de, 3,3%, 3,8% e 9,1%, para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respetivamente.

Os resultados da Fig. 7d mostraram que em regime laminar, as amostras de nanofluido CNT_300 apresentaram uma tendência de incremento no coeficiente de transferência de calor médio de, 1,2%, 1,3% e 1,5%, para as amostras CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respetivamente. Os incrementos do coeficiente de transferência de calor em regime turbulento foram em média de, 2,0%, 3,0% e 6,3%, para as amostras CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respetivamente. Vale ressaltar que, nas amostras de nanofluido de menor concentração CNT_800_1 e CNT_300_1, não foi observado aumento no coeficiente de transferência de calor quando comparado com o fluido base.

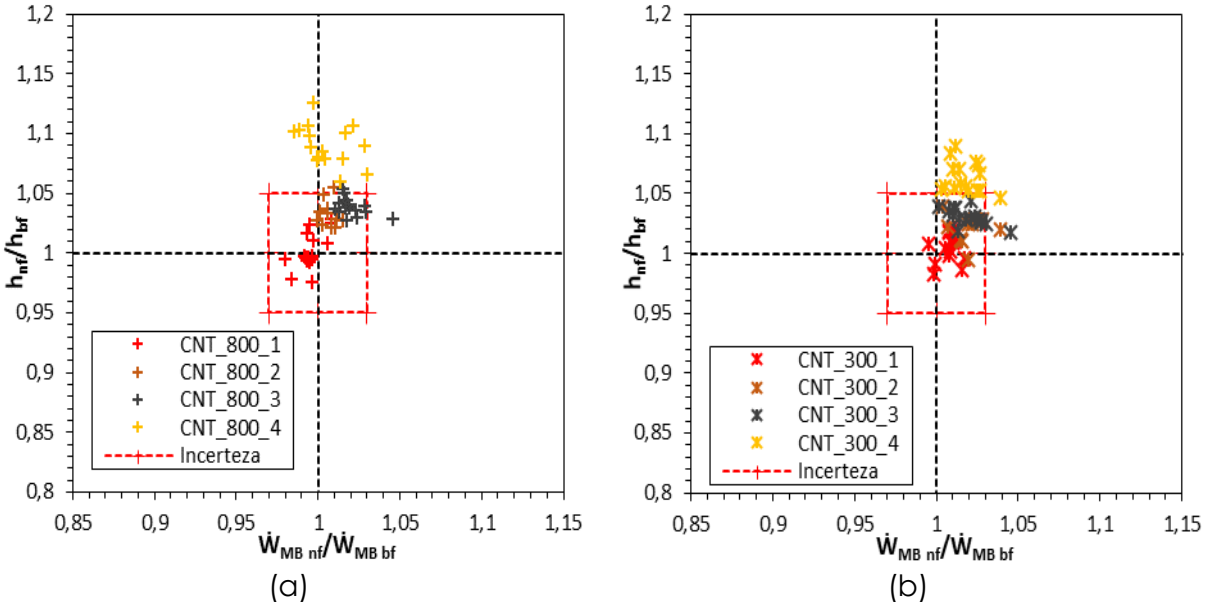
Nesse sentido, nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300) pode ser observado um efeito da adição de nanopartícula no aumento do coeficiente de transferência de calor em regime laminar e turbulento. Por outro lado, as amostras de nanofluido CNT_800 apresentaram maiores incrementos no coeficiente de transferência de calor regime laminar e turbulento quando comparados com incrementos observados nas amostras CNT_300 na mesma concentração volumétrica de nanopartícula.

5 DESEMPENHO TERMO-HIDRÁULICO

Para descrever o desempenho termo-hidráulico de todas as amostras de nanofluidos testados foi estabelecida uma comparação que específica o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção em função da potência de bombeamento relativa. É importante ressaltar que os testes térmicos e hidráulicos foram realizados simultaneamente. Assim, a potência de bombeamento consumida na seção de teste foi calculada por intermédio da Eq. 5. Os resultados obtidos para as amostras de nanofluido a base da mistura (H_2O:EG 50:50 wt%), CNT_800, CNT_300 são apresentados nas Figs. 8a e 8b, respetivamente.

$$\dot{W}_B = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho} \tag{5}$$

Figura 8 - Resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção [h_{nf}/h_{fb}] em função da potência de bombeamento relativa [$\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$]. (a) CNT_800. (b) CNT_300.



Portanto, adotando o critério estabelecido para quantificar a potencialidade de aplicação dos nanofluidos a base da mistura (H_2O:EG 50:50 wt%) em função do desempenho termo-hidráulico, a amostra de nanofluido de maior concentração volumétrica de nanopartícula e com razão de aspecto (r=l/d=800), CNT_800_4 foi a que apresentou o melhor desempenho termo-hidráulico, dado que, foram obtidos incrementos próximos ou maiores que 10% no coeficiente de transferência de calor por convecção, e incrementos pouco significativos na potência de bombeamento.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos das medições de condutividade térmica para as amostras de nanofluido a base da mistura (H_2O:EG 50:50 wt%), indicaram incrementos máximos de 7,4% e 6,1% para as amostras de maior concentração de nanopartículas CNT_800_4 e CNT_300_4.

A viscosidade dos nanofluidos foi, também, outro parâmetro determinado experimentalmente, indicando incrementos em média de 6,8% para a amostra de CNT_800_4 e 4,9 % para a amostra CNT_300_4.

Os resultados obtidos para as amostras de nanofluido a base de (H_2O:EG 50:50 wt%), em termos da combinação da transferência de calor e potência de bombeamento, se mostraram satisfatórios nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 e CNT_300 de maior concentração volumétrica de nanopartícula, dado que, foram obtidos incrementos significativos do coeficiente de transferência de calor próximos de 10% e diferencias pouco significativos da potência bombeamento quando comparada ao fluido base.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio recebido nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

CHOI, S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. [S.l.]: ASME. p. 99-105, 1995.

GNIELINSKI, V. Neue Gleichungen für den Wärme- und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen. **Forschung im Ingenieurwesen** A, v. 41, n. 1. p. 8-16, 1975.

JIANG, W.; DING, G.; HAO PENG. Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 48, n. 6, p. 1108-1115, 2009.

PETUKHOV, B. S. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties. **Advances in heat transfer**, New York, v. 6, n. 503, p. 503–565, 1970.

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. 1, p. 556-592, January 2019. ISSN 1879-0690.

SIEDER, E. N.; TATE, G. E. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 28, n. 12, p. 1429-1435, 1936.

YU, C.-J. et al. Molecular layering in a liquid on a solid substrate: an X-ray reflectivity study. **Physica B: Condensed Matter**, v. 283, n. 1-3, p. 27-31, 2000.