

PROPOSTA DE ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO-HIDRÁULICO DE NANOFLUÍDEOS COMO REFRIGERANTE EM REATORES NUCLEARES DE ÁGUA LEVE (LWR)

PROPOSAL FOR AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMAL- HYDRAULIC PERFORMANCE OF NANOFLUIDS AS COOLANT IN LIGHT WATER NUCLEAR REACTORS (LWR)

A. Melo de Oliveira¹, A. Zacarias Mesquita², Ê. Pedone Bandarra³, A. O. Cárdenas
Gómez⁴, L. Matias Gonçalves⁵

^{1,2}Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Belo Horizonte – Brasil.

^{3,4}Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia – Brasil.

⁵Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itabira – Brasil.

RESUMO

O desenvolvimento de nanofluidos é extremamente importante para melhorar a condutividade térmica dos fluidos base. Uma das maneiras de melhorar a segurança de usinas nucleares está relacionada à melhoria da capacidade de transferência de calor. O estudo de novos fluidos que melhoram a taxa de remoção de calor é fundamental para se obter maior eficiência dos sistemas energéticos. Entre os diversos fatores que comprometem a eficiência dos sistemas energéticos, é possível destacar as limitações termofísicas dos fluidos convencionais. Essas limitações inibem, bastante significativamente, algumas aplicações industriais. Este artigo apresenta uma proposta de trabalho a ser realizada no Laboratório Termo-Hidráulico do CDTN, cujo objetivo é o estudo da melhoria das características de transferência de calor do refrigerante, utilizado no circuito primário de reatores nucleares, através da adição de nanopartículas. Os nanotubos de carbono serão usados principalmente em água leve, que é o fluido de resfriamento mais usado em reatores nucleares. Como suporte ao trabalho, uma bancada experimental será projetada, montada e calibrada para estudar o comportamento termo-hidráulico desses componentes.

ABSTRACT

The development of nanofluids is extremely important for improving the thermal conductivity of the base fluids. One of the ways to improve the safety of nuclear power plants is related to improving their heat transfer capacity. The study of new fluids that improve the rate of removal of heat is fundamental to obtain greater efficiency of energy systems. Among the several factors that compromise the efficiency of energy systems, it is possible to highlight the thermophysical limitations of conventional fluids. These limitations inhibit, quite significantly, some industrial applications. This paper presents a work proposal to be carried out in the Thermo-Hydraulic Laboratory of the CDTN, whose objective is the study of the improvement of the heat transfer characteristics of the refrigerant, used in the primary circuit of nuclear reactors, through the addition of nanoparticles. Carbon nanotubes will be used mainly in light water, which is the most commonly used cooling fluid for nuclear reactors. As support to the work, an experimental workbench will be designed, assembled and calibrated in order to study the thermo-hydraulic behavior of these components.

1. INTRODUÇÃO

Os nanofluidos são conhecidos por apresentar a possibilidade de maior transferência de calor e, portanto, são investigados para aplicações de engenharia [1, 2, 3]. O estudo de novos fluidos que melhoram a taxa de remoção de calor é fundamental para se obter maior eficiência dos sistemas energéticos. Dentre os diversos fatores que comprometem a eficiência dos sistemas de energia, é possível destacar as limitações termofísicas dos fluidos convencionais, inibindo de forma bastante significativa algumas aplicações industriais. Neste trabalho, pretendemos estudar as características de transferência de calor de fluidos comumente utilizados, através da adição de nanopartículas, feitas de nanotubos de carbono, em água leve. A água é o fluido mais comumente usado no resfriamento de reatores nucleares.

A melhoria das propriedades térmicas é limitada pela condutividade térmica do fluido de trabalho. Para superar essas limitações, vários estudos de fluidos com partículas sólidas em suspensões foram realizados desde a primeira publicação de Maxwell no final do século XIX [4]. De acordo com [5], no entanto, tais estudos se limitam ao uso de partículas de microescala, que apresentam algumas desvantagens como:

- Sedimentação - as partículas, depois de algum tempo, sedimentam, criando uma camada próxima às superfícies reduzindo a capacidade térmica.
- Desgaste - A sedimentação pode ser reduzida aumentando a velocidade de fluxo do fluido, mas com maior desgaste de equipamentos e tubulações, etc.
- Obstrução - Devido ao tamanho das partículas, os canais tendem a ficar entupidos, principalmente nos canais de resfriamento estreitos.
- Perdas de carga - aumentam significativamente.
- Condutividade térmica - é proporcional à concentração de partículas, mas potencializa problemas anteriores.

2. NANOFUIDOS

Os nanofluidos são compostos de dispersões coloidais com um refrigerante tradicional como base, no qual as nanopartículas são suspensas. Em 1995, Choi [6] foi o primeiro a usar o termo "nanofluidos" e publicou os resultados de sua pesquisa teórica. Os desenvolvimentos subsequentes na engenharia de nanofluidos contribuíram para o rápido crescimento da nanotecnologia e das tecnologias de superfície ao longo da última década [7].

As suspensões coloidais foram substancialmente intrigantes do ponto de vista do desempenho térmico, em quatro pontos [6]:

1. Aumento da condutividade térmica (aprox. 150%);
2. Aumento monofásico do coeficiente de transferência de calor (aprox. 60%);
3. Aumento do fluxo de calor crítico com regime de ebulição nucleada prolongado (aprox. 200%);
4. Maior eficiência de resfriamento.

Verificou-se que exibem propriedades térmicas melhoradas, por exemplo, quando actuam como refrigerante, elevam o ponto crítico do fluxo de calor e a molhabilidade da superfície em pequenas concentrações, o que é uma característica útil em reatores nucleares.

Em trabalho recente [8], eles avaliaram experimentalmente nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) baseados em água, com concentrações de volume de $0 < \phi < 0,24\%$, para vazões mássicas de 20 g / s a 90 g / s. O calor fornecido pela parede do tubo através da resistência na seção de teste variou de 500 W a 900 W. A avaliação do desempenho termo-hidráulico das três amostras de nanofluidos testadas foi realizada especificando o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção como uma função da potência de bombeamento relativa obtida nas potências de bombeamento na seção de teste. As três amostras mostraram um aumento na condutividade térmica, em média, de 6,3%, 8,8% e 17% maior do que o fluido base (água destilada). Demonstrando o efeito da concentração no aumento dessa propriedade. No entanto, as três amostras

também mostraram um aumento na viscosidade em média de 8,8%, 17,8% e 11,6%.

Muito tem sido estudado em relação ao desempenho da transferência de calor em

vários tipos de fluxo utilizando nanofluidos, constituídos de nanopartículas de diferentes materiais e vários fluidos de base, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação do trabalho de análise da transferência de calor por convecção em nanofluidos [6].

Autor	Faixa de fluxo	Tipo de Nanofluido	Incremento no coeficiente convectivo h (%)
[13]	Turbulento	Al ₂ O ₃ em água	+45
[20]	Laminar	Al ₂ O ₃ em água	+47
[21]	Turbulento	SiC em água	-7 para 3.5vol% com mesma velocidade
[5]	Turbulento	TiO ₂ em água	+26 para 1vol% -14 para 2vol%
[16]	Turbulento	TiO ₂ em água	+22
[7]	Turbulento	TiO ₂ e Al ₂ O ₃ em água	+15%, mesmo número de Reynolds. -10%, mesma potência de bombeamento

Embora muitos dos estudos relatados mostrem que houve um aumento na transferência de calor por convecção forçada utilizando nanofluidos, fluido em regime laminar e turbulento, outros estudos mostram inconsistências nos resultados apresentados, ou seja, sob certas condições, eles relatam um aumento no coeficiente de transferência de calor. Há situações em que não há nem adição nem diminuição no coeficiente de transferência de calor por convecção quando as nanopartículas são adicionadas aos fluidos base. No entanto, em alguns casos, a redução do valor do coeficiente de transferência de calor por convecção é anotada. Portanto, mais estudos são necessários para validar e verificar o desempenho termo-hidráulico desses novos fluidos de resfriamento [8].

Um estudo foi conduzido sobre o uso de nanofluidos para sistemas de resfriamento central de emergência, que é uma característica de segurança de usinas nucleares [3]. Estes estudos mostraram que houve um aumento no fluxo de calor crítico através da injeção de nanofluido em caso de perda de refrigeração por acidente.

Curvas de inibição (temperatura versus tempo) foram obtidas em esferas pequenas

de metal (~ 1 cm) expostas a água pura e nanofluidos à base de água com nanopartículas de alumina, sílica e diamante em baixas concentrações ($\leq 0,1\%$ Vol) [16]. As contas usadas foram feitas de aço inoxidável e zircaloy, e foram resfriadas a partir de uma temperatura inicial de aproximadamente 1000 ° C. Os resultados mostram que o comportamento de temperatura em nanofluidos é quase idêntico ao da água pura. No entanto, verificou-se que algumas nanopartículas se acumulam na superfície da esfera, o que resulta na desestabilização do filme de vapor em testes subsequentes com a mesma esfera, acelerando grandemente o processo de arrefecimento.

Nanofluidos consistindo de dispersões diluídas de alumina, zircônia e nanopartículas de sílica em água foram usados. Vários parâmetros que afetam a transferência de calor (ponto de ebulição, viscosidade, condutividade térmica e tensão de superfície em ebulição) foram medidos e consistentes com outros estudos de nanofluidos [17], foi encontrado para ser semelhante à água pura. No entanto, os experimentos de ebulição em piscina mostraram melhoras significativas no fluxo de calor crítico em nanofluidos (até 200%).

3. METODOLOGIA

O principal objetivo desta pesquisa é o estudo e a melhoria da condutividade térmica em sistemas nanofluidos com adição de nanotubos de carbono. Para isso, existem vários métodos, que se destinam a ser utilizados para a medição da condutividade térmica, a saber: oscilações de temperatura, placas estacionárias paralelas e a técnica do fio quente transiente, sendo esta última a mais utilizada [18].

A técnica do fio quente funciona medindo a resposta temperatura / tempo do sistema a um pulso elétrico abrupto. Nesta técnica, o fio atua como um aquecedor e termômetro, sendo a condutividade térmica calculada através de uma derivação da lei de Fourier.

Sistemas com suspensão de nanotubos de carbono apresentaram os maiores valores de condutividade térmica. Um estudo realizado por [19] sobre nanofluidos compostos por nanotubos de parede múltipla adicionados ao óleo, com o objetivo de medir a condutividade térmica efetiva. Os resultados experimentais foram anotados porque foram muito superiores aos indicados pelas previsões teóricas.

Em trabalho recente [9], os nanofluidos baseados em água de Al₂O₃ e ZrO₂ foram caracterizados por seu uso promissor em aplicações de transferência de calor. Foram preparadas três concentrações diferentes de soluções dispersas de nanofluidos citados (0,01 vol%, 0,05 vol% e 0,1 vol%) de nanofluidos comerciais. Medições experimentais foram realizadas em diferentes temperaturas. Condutividade térmica, viscosidade e densidade de nanofluidos foram medidas. Concluiu-se que a concentração em volume, tamanho de partícula/forma e temperatura são variáveis importantes.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Esta pesquisa começou em março do ano 2016. No momento a revisão bibliográfica está em andamento, incluindo a pesquisa

dos nanofluidos mais adequados a serem adquiridos para testes na bancada experimental.

Devido ao potencial do uso de nanofluidos em sistemas de resfriamento de reatores nucleares, mesmo com a pesquisa ainda em andamento, verificou-se a viabilidade desta aplicação. Além disso, é possível melhorar as características de transferência de calor de fluidos comumente usados como refrigerantes, adicionando nanopartículas compostas de nanotubos de carbono. E atuando como principal refrigerante em sistemas de segurança, contribuindo para a mitigação de acidentes graves.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições brasileiras: Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação para o Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

REFERÊNCIAS

- [1] Choi, S.U.S. "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles". *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, New York, 23, 99-105, (1995).
- [2] Kim, H *et al.*, "On the quenching of steel and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles". *International Journal of Multiphase Flow*, 35, 427-438, (2009).
- [3] Sajadi, A.R.; Kazemi, M.H. "Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, n. 10. 1474-1478. (2011).
- [4] Choi, S.U.S. "Nanofluid Technology: Current status and future research". *Second Korean-American Scientists and Engineers Association Research Trend Study Project Review and the Korea-U.S.*, Viena-VA, (1998).

- [5] Wen, D.; Ding, Y. “Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n. 47. 5181-5188. (2004).
- [6] Choi, S.U.S. “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles”. *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, New York, 23, 99-105, (1995).
- [7] Duangthongsuk, W; Wongwises, S. “Effect of thermophysical properties models on the predicting of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid”. *International Communications in Heat and Mass Transf.* Vol. 35, 1320–1326. (2008).
- [8] Haghghi, E.B *et al.*, “Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparison of Their Performance”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (2014).
- [9] Rocha, Marcelo S *et al.*, “Thermophysical Characterization of Al₂O₃ and ZrO₂ Nanofluids as Emergency Cooling Fluids of Future Generations of Nuclear Reactors”. *Proceedings:: 2015 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Nice-France*, (2015).
- [10] Wen, D.; Ding, Y. “Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n. 47. 5181-5188. (2004).
- [11] Yu, W *et al.*, “Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n. 52, 3606-3612. (2009).
- [12] Experimental do Desempenho Termo-Hidráulico de Nanofluidos MWCNTs/H₂O”. *Simpósio do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia-MG*, (2014).
- [13] Silva, B.A.A.D. “Caracterização de nanofluidos do ponto de vista termo-físico”. *Universidade de Aveiro*, (2010).
- [14] Kang, M. *et al.*, “Design process of the nanofluid injection mechanism in nuclear power plants”. *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, n. 1 (2011).
- [15] Haghghi, *et al.*, “Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparison of Their Performance”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (2014).
- [16] Kim, S. J., “Pool boiling heat transfer characteristics of nanofluids”, (2007). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1721.1/41306>. Acessado em 05 jan 2016.
- [17] Yanjiao, *et al.*, “A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization”, *Powder Technology*, pp. 89-101 (2009).
- [18] Pak, B. C. and Cho, Y. I., “Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles”. *Exp. Heat Transfer*, n. 11, pp. 151-170, (1998).
- [19] Chupin, A *et al.*, “Applications of nanofluids to enhance LWR accidents management in in-vessel retention and emergency core cooling systems”. *Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, California*, (2008)