

USO DE NANO-LUBRIFICANTES EM COMPRESSORES DE AR CONDICIONADO E REFRIGERAÇÃO - UMA REVISÃO

David Fernando Marcucci Pico, UFU, dmarcucci@ufu.br

Edwin Martín Cardenas Contreras, UFU, emcardenas.1989@gmail.com

Victor Hugo Panato, UFU, vpanato@ufu.br

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

Resumo: Neste trabalho foi realizada uma breve revisão bibliográfica da utilização de nanofluidos em sistemas de ar condicionado e refrigeração como aditivo do óleo lubrificante do compressor. Baseado na literatura tem-se encontrado certas vantagens de usar nanopartículas como aditivo lubrificante como: melhorar a condutividade térmica do óleo base, melhores propriedades lubrificantes ao funcionar como modificadores do atrito, apresentar uma melhor miscibilidade do óleo mineral em fluidos refrigerantes HFCs (Hidrofluorocarbonetos), além de uma diminuição do consumo de energia do sistema e aumento no COP (Coeficiente de Performance).

Palavras-chave: Nanofluido, nano-lubrificante, refrigeração, compressor

1. INTRODUÇÃO

Na busca por sistemas de ar condicionado e refrigeração mais eficientes e com menor impacto ao meio ambiente, tem-se pesquisado muitas alternativas para o sistema de refrigeração. Dentre essas, o desenvolvimento de novos fluidos refrigerantes com baixos valores de GWP (Potencial de aquecimento global), que reduz o impacto no efeito estufa. Por outro lado, diferentes melhorias são feitas nos equipamentos que compõem os sistemas de ar condicionado. A nanotecnologia coloca a favor dos engenheiros e cientistas mais uma alternativa, os nanofluidos. O termo nanofluido foi introduzido por Choi and Eastman (1995) como uma mistura de partículas de escala nanométrica (1 – 100 nm) com elevada condutividade térmica em fluidos de transferência de calor convencionais, os quais recebem o nome de fluidos base. Atualmente, os nanofluidos são um tema de pesquisa para diversas aplicações e áreas do conhecimento, mas não podem ser limitados apenas à transferência de calor. Segundo Alawi et al. (2015) os nanofluidos podem ser classificados em função de suas múltiplas aplicações como nanofluidos de transferência de calor, tribológicos, surfactantes e tratamento de superfícies, químicos, ambientais, medicinais etc.

Num sistema de ar condicionado ou refrigeração o compressor é o principal elemento que compõe o sistema. Apresenta o maior consumo de energia, muito superior aos outros dispositivos. Desta forma, qualquer diminuição no consumo de energia nesse equipamento influencia diretamente no coeficiente de performance global. Esta é o motivo que muitos autores centram suas atenções nesse dispositivo. Como a perda de eficiência do compressor está muito ligado ao atrito interno desse componente, pesquisas sobre o óleo do lubrificante do compressor tem grande importância. Kumar and Elansezhian (2012) realizaram um trabalho experimental utilizando com fluido refrigerante R134a e uma mistura de óleo PAG (Polyalquilenoglycol) com nanopartículas de TiO_2 , onde atingiu uma redução de 10,32% na energia líquida consumida no sistema.

Os óleos lubrificantes além de diminuir o atrito nos componentes móveis dos compressores, têm como função auxiliar na troca de calor, melhorando o resfriamento do estator e das peças móveis, garantindo uma operação segura. Funciona também na redução dos vazamentos de gás no processo de compressão (entre as volutas fixas e móveis), melhorando assim a eficiência volumétrica dos mesmos. Tendo em conta as funções do lubrificante nos compressores, é importante levar em conjunto as duas áreas. A transferência de calor procurando aumentar o coeficiente de transferência de calor e na parte tribológica, na procura de nanopartículas que possam mudar os mecanismos de atrito outorgando. Fatores de atrito mais baixos, maior proteção das superfícies apresentando efeitos concertadores, polimento de superfícies pelo reduzido tamanho e geração de tribo-camadas pelo resultado de reações tribo-químicas (Dai et al., 2016).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Condutividade térmica em nanofluidos

Nanofluidos são uma mistura de sólido / líquido projetadas pela dispersão de partículas de tamanho nanométrico (nanopartículas) ou qualquer tipo de nanoestruturas em líquidos de base convencionais. De acordo com Angayarkanni and Philip (2015) as nanopartículas podem ser compostos metálicos / intermetálicos (Ex. Ag, Cu, Ni, Au e Fe), compostos cerâmicos como óxidos, sulfetos e carbonetos. Entre as cerâmicas, Al_2O_3 , MoS_2 , Fe_3O_4 , CuO , TiO_2 , ZnO e SiC são alguns materiais que tem sido fornecido e pesquisado. Outras partículas tem sido trabalhadas por diferentes pesquisadores, como

nanopartículas híbridas, compostas por dois ou mais materiais de tamanho nanométrico (Sundar et al., 2017).

A busca por uma melhoria da eficiência energética é realizada por meio de trabalhos experimentais, modelagem matemática e simulação numérica. Não restrito aos sistemas de refrigeração, mas também em sistemas de refrigeração automotiva, eletrônica, medicina e outros. Estudos sobre nanofluidos mostram uma influência muito significativa nas propriedades termo físicas, como condutividade térmica, viscosidade e coeficientes de transferência de calor, comparado aos os fluidos bases (Ex. água, etileno glicol e óleo lubrificante).

Condutividade térmica é a propriedade termo físicas mais significativa quando se avalia a utilização de nanofluidos para aplicações de transferência de calor. A água possui a mais elevada condutividade térmica entre os fluidos usualmente utilizados, embora de ordem muito inferior à maioria dos metais e óxidos de metal, como pode ser observado na Fig. 1.

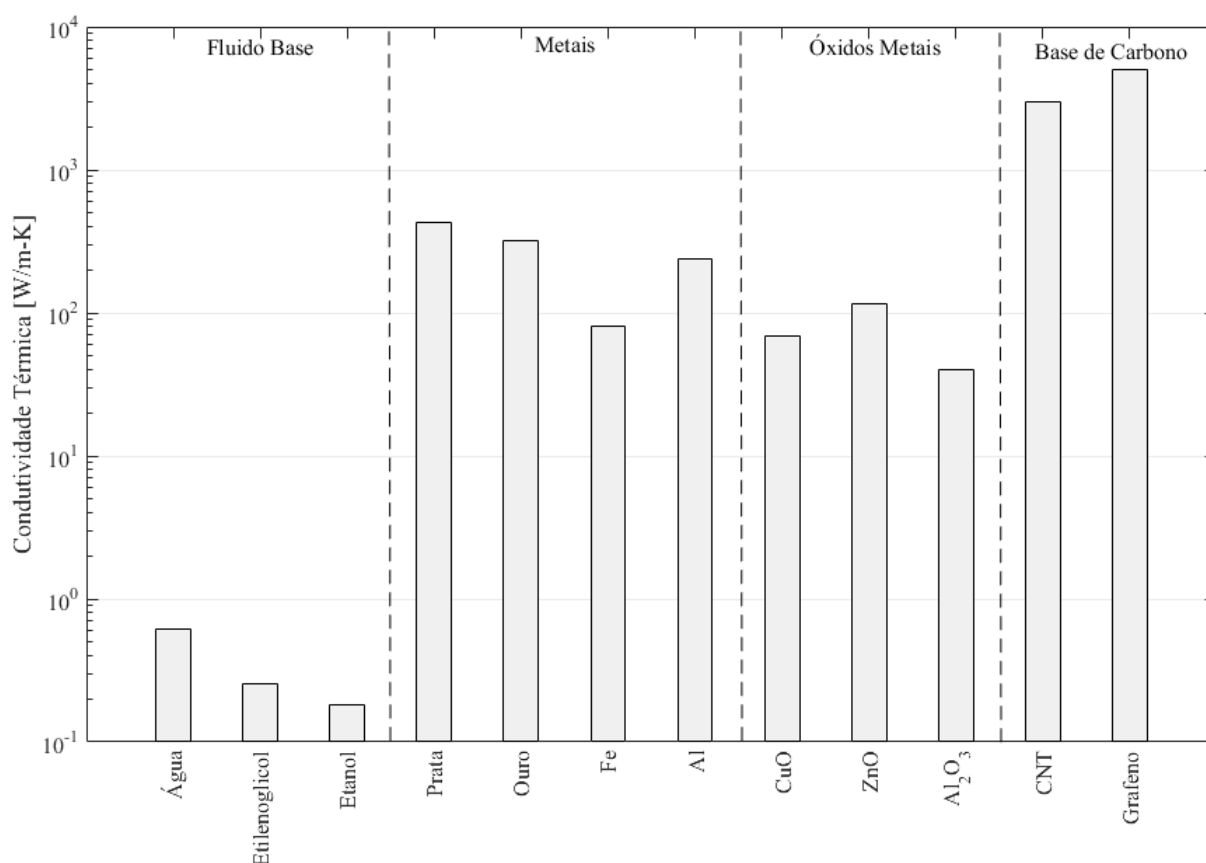


Figura 1: Condutividade térmica dos materiais. Adaptada de Wen et al. (2009).

A análise comparativa dessa propriedade, sugere que a adição de partículas sólidas em um líquido base, para aumentar a sua condutividade térmica (k) é viável, conceito este que tem sido praticado. Os estudos iniciais, utilizaram, no entanto, suspensões de partículas de tamanho milimétrico e micrométrico, o que levou a problemas como a má suspensão e a estabilidade, provocando o entupimento do canal entre outros problemas, muitas vezes graves para sistemas compostos por tubos de seção reduzida Wang et al. (2003).

Na Tab. 1 apresenta-se um resumo de alguns dos resultados de trabalhos recentes na literatura da medição de condutividade térmica em nanofluidos.

2.2. Aumento na viscosidade de nanofluidos

Embora a condutividade térmica seja a principal propriedade de um fluido nas aplicações em análise, sua análise exclusiva não é suficiente para conclusão sobre a utilização do nanofluido. A viscosidade é outro parâmetro importante na análise dos nanofluidos como solução para substituição de fluidos comuns utilizados em processos de transferência de calor. A viscosidade desempenha um papel importante em todas as aplicações que envolvem fluidos e é definida pela resistência interna de um fluido ao escoamento (Hwang et al., 2008). Após a adição de nanopartículas ao fluido base, espera-se que a viscosidade do nanofluido seja maior, ocasionando um efeito negativo sobre a potência de bombeamento

Tabela 1: Resultados experimentais de condutividade térmica em nanofluidos.

Autor	Nanopartícula	Fluido base	Temperatura	Concentração	Aumento na condutividade térmica
Li and Zou (2016)	<i>SiC</i>	EG 40% Água 60%	10-50°C	0-0,1% vol.	33,8%
Mohammad and Mohsen (2016)	<i>SiO₂</i>	Ethanol	25-70°C	0,15-1,17% vol.	60%
Oliveira et al. (2016)	MWCNT's	Água	25-50°C	0,08-0,16% wt	5%
Usri et al. (2015)	<i>Al₂O₃</i>	EG / Água 40:60% 50:50% 60:40%	30-70°C	0,5-2% vol.	16% (40:60%)
Hajjar et al. (2014)	Oxido de Grafeno	Água	10-40°C	0,05-0,25% wt.	47,5%

e o coeficiente de transferência de calor. Estes são parâmetros muito significativos em aplicações de transferência de calor reais.

Na Tab. 2 são apresentadas investigações experimentais sobre a influência da concentração de nanopartículas na viscosidade dos nanofluidos. Na maioria dos casos os resultados mostraram um aumento significativo comparado com o fluido base.

Tabela 2: Resultados experimentais de viscosidade em nanofluidos.

Autor	Nanopartícula	Fluido base	Temperatura	Concentração	Aumento na viscosidade
Huminic et al. (2015)	<i>FeC</i>	Água	10-70°C	0,1 -1% wt	34%
Shanbedi et al. (2015)	MWCNT's	Água/ CTAB-STD	20-80°C	0,1% wt para razões de 0,5/1,0/2	20% para Água/CTAB com razão de 0,5-1
Gomez et al. (2015)	CNT	Água	5-25°C	0,12-0,24% vol.	17,8%
Sundar et al. (2014)	<i>Al₂O₃</i>	EG / Água 20:80% 40:60% 60:40	0-60°C	0,3-1,5% vol.	230%
Li et al. (2014)	<i>ZnO</i>	EG	15-55°C	1,75-10,5% wt	150 a 200%

2.3. Influência das nanopartículas na redução do fator de atrito

O uso de nanopartículas como aditivos lubrificantes em sistemas de refrigeração têm apresentado diferentes vantagens nas quais se destaca a diminuição do fator de atrito em comparação com o fluido base, uma melhora da miscibilidade dos óleos minerais ao trabalhar com refrigerantes HFCs e o incremento na taxa de retorno do óleo do sistema ao compressor (Alawi et al., 2015). O fator de atrito pode ser influenciado por muitas variáveis como: sua concentração, composição química, tamanho da partícula, morfologia das nanopartículas, o método de preparação (Dai et al., 2016).

Sabareesh et al. (2012) desenvolveram um trabalho experimental aplicado em sistemas de refrigeração por compressão de vapor utilizando refrigerante R12 (Clorodifluorometano) e uma mistura de nanopartículas de *TiO₂* e óleo mineral. Eles utilizaram diferentes concentrações entre 0,005-0,015% vol. onde as concentrações mais altas apresentaram viscosidades cinemáticas maiores com tendência a diminuição com a temperatura. Além disso, foi avaliado o coeficiente de atrito utilizando um tribômetro de pino-disco, onde foi possível determinar que o coeficiente de atrito diminui com o aumento da concentração, até o valor de 0,11% em vol. Essa ponto resultou em uma redução de 31,9% do coeficiente de atrito. Com a aumento da concentração, acima desse valor, o coeficiente de atrito apresenta crescimento.

Luo et al. (2014) testaram as propriedades tribológicas de óleos lubrificantes usando nanopartículas de *Al₂O₃* (Alumina). Eles experimentaram concentrações entre 0,05-1% wt e analisaram seu impacto no coeficiente de atrito. A maior

redução foi obtida com uma concentração de 0,1% wt, que resultou em uma redução de 17,61% no coeficiente de atrito inicial, sem nanopartículas.

Jia et al. (2014) avaliaram as propriedades tribológicas e o desempenho do óleo lubrificante num sistema de refrigeração doméstica, utilizando como aditivo nanopartículas híbridas, compostas por $MoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$ e Fulereno. O fator de atrito dos nanofluidos foi testado, obtendo reduções de 41,7% e 38,1% comparado com óleo puro, na Fig. 2 apresenta um gráfico do fator de atrito em função do tempo e da concentração para os dois nanofluidos e o óleo base testados.

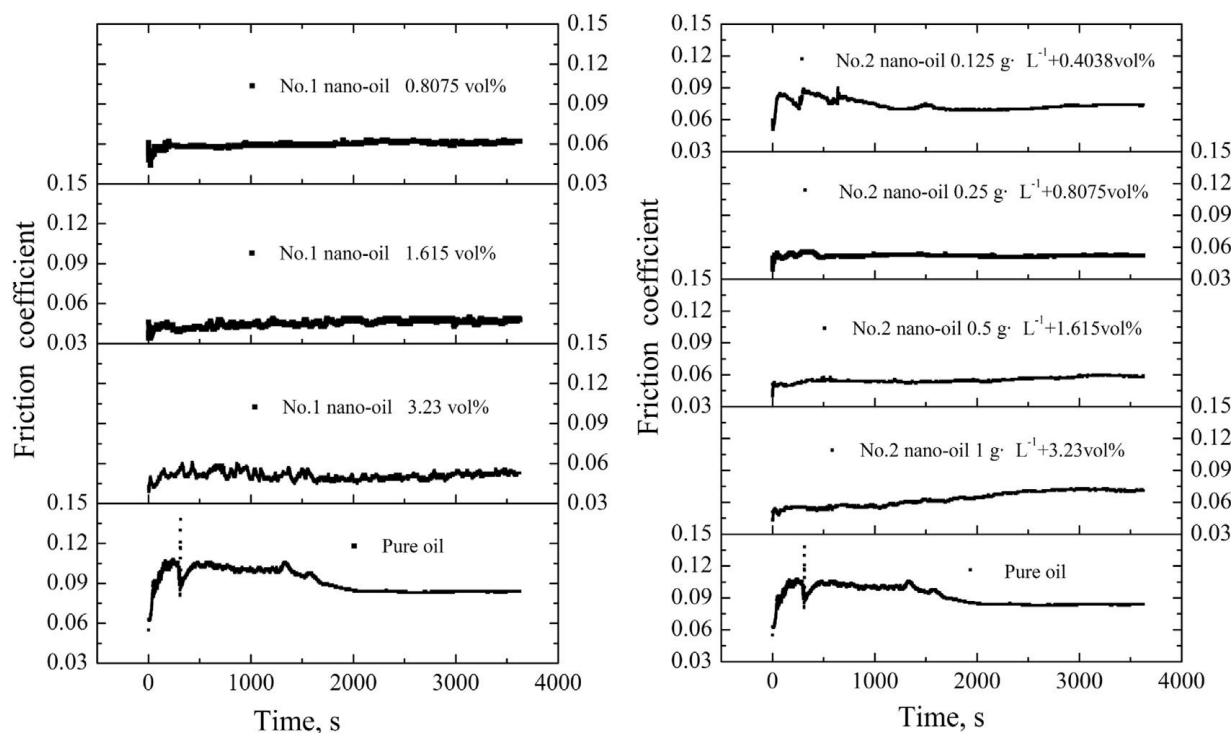


Figura 2: Coeficiente de atrito para diferentes concentrações, fonte: Jia et al. (2014).

2.4. Influência das nanopartículas no COP

O coeficiente de desempenho de um sistema de refrigeração é inversamente proporcional ao trabalho realizado pelo compressor, desta forma, qualquer redução no trabalho do compressor, por meio da redução de suas perdas, impactará no aumento do COP global do sistema. Segundo a literatura, a utilização dos nano-fluidos resulta em melhoria da transferência de calor e nas propriedades tribológicas, promovendo uma redução no consumo de energia. A Tab. 3 apresenta um resumo de trabalhos experimentais que utilizaram nano-lubrificantes em sistemas de refrigeração

Tabela 3: Trabalhos experimentais com utilização de nano-lubrificante em sistemas de refrigeração e ar condicionado

Autor	Refrigerante	Nanopartícula	Óleo base	Conclusão
Jia et al. (2014)	R134a	$MoFe_2O_4 - NiFe_2O_4$	Mineral	Incremento no COP
	R600a	$MoFe_2O_4 - NiFe_2O_4$ /Fulereno		1,01-0,14% (R134a) e 5,33% (R600a)
Hussen (2014)	R22	TiO_2	Mineral	Incremento no COP 11,99%
Padmanabhan and Palanisamy (2012)	R134a	TiO_2	Mineral	Redução de energia 29,6% (R134a)
	R436A			11,08% (R436A)
	R436B			10,4%(R436B)
Abbas et al. (2013)	R134a	CNT	POE	Incremento no COP 4,2%
Sabareesh et al. (2012)	R12	TiO_2	Mineral	Incremento no COP 17%

3. CONCLUSÕES

Segundo a revisão bibliográfica feita neste trabalho nanofluidos podem ser uma alternativa viável para trabalhar em sistemas de refrigeração e ar condicionado, melhorando o coeficiente de desempenho dos fluidos lubrificantes usados geralmente, devido à influência que fazem as nanopartículas nas propriedades térmicas e tribológicas. Elevados percentagens de redução e incremento, da energia consumida pelo compressor e COP's respectivamente.

As nanopartículas mais trabalhadas até hoje em sistemas de refrigeração são a alumina (Al_2O_3) e o dióxido de titânio (TiO_2) as quais apresentaram relevantes incrementos nas variáveis de interesse. Embora, ainda faltam uma ampla variedade de combinações entre refrigerantes, óleos, nanopartículas e tipos de compressores.

Um estudo importante é a síntese e caracterização, com a finalidade de evitar algum tipo agregação e sedimentação das nanopartículas que possa afetar diretamente as propriedades da mistura, porém um comportamento no desejado levando-o a obter resultados não esperados. Alguns autores sugerem em seus trabalhos métodos para melhorar a estabilidade das suspensões tais como a agitação ultrassônica e a utilização de agente como surfactantes e dispersantes. Esses métodos podem alterar as propriedades e superfícies de nanopartículas em suspensão e pode ser utilizado para suprimir a formação de aglomerados de partículas, a fim de obter suspensões estáveis. O uso de essas técnicas vai depender da aplicação desejada do nano-lubrificante.

Por outra parte é importante lembrar na hora de selecionar nanopartículas fazer uma revisão sobre o impacto delas no meio ambiente e na influência na saúde dos seres humanos sendo.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as entidades de fomento e apoio a pesquisa CAPES, CNPQ e FAPEMIG ao laboratório LEST-nano da Universidade Federal de Uberlândia

5. REFERÊNCIAS

- M. Abbas, R. G. Walvekar, M. T. Hajibeigy, and S. Farhood. Efficient Air-Condition Unit By Using Nano-Refrigerant. pages 87–88, 2013.
- O. A. Alawi, N. A. C. Sidik, and M. Beriache. Applications of nanorefrigerant and nanolubricants in refrigeration, air-conditioning and heat pump systems: A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68:91–97, 2015. ISSN 07351933. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.08.014.
- S. A. Angayarkanni and J. Philip. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 225:146–176, 2015. ISSN 00018686. doi: 10.1016/j.cis.2015.08.014.
- S. Choi and J. Eastman. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 66:99–105, 1995. ISSN 00221481. doi: 10.1115/1.1532008.
- W. Dai, B. Kheireddin, H. Gao, and H. Liang. Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 102: 88–98, 2016. ISSN 0301679X. doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
- A. O. C. Gomez, A. R. K. Hoffmann, and E. P. Bandarra Filho. Experimental evaluation of CNT nanofluids in single-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86:277–287, 2015. ISSN 00179310. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.066.
- Z. Hajjar, A. morad Rashidi, and A. Ghosatloo. Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57:128–131, 2014. ISSN 07351933. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.018.
- A. Huminic, G. Huminic, C. Fleaca, F. Dumitrache, and I. Morjan. Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles. *Powder Technology*, 284:78–84, 2015. ISSN 00325910. doi: 10.1016/j.powtec.2015.06.040.
- H. A. Hussien. Experimental Investigation for TiO_2 nanoparticles as a Lubricant- Additive for a Compressor of Window Type Air-Conditioner System. *Journal of Engineering*, 20(2), 2014.
- Y. Hwang, J.-K. Lee, J.-K. Lee, Y.-M. Jeong, S.-i. Cheong, Y.-C. Ahn, and S. H. Kim. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. *Powder Technology*, 186(2):145–153, 2008. ISSN 00325910. doi: 10.1016/j.powtec.2007.11.020.

- T. Jia, R. Wang, and R. Xu. Performance of MoFe₂O₄-NiFe₂O₄/Fullerene-added nano-oil applied in the domestic refrigerator compressors. *Energy Economics*, 45:120–127, 2014. ISSN 01409883. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.06.001.
- D. S. Kumar and R. Elansezhian. Experimental Study on Al₂O₃-R134a Nano Refrigerant in Refrigeration System. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2(5):3927–3929, 2012.
- H. Li, L. Wang, Y. He, Y. Hu, J. Zhu, and B. Jiang. Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 88:363–368, 2014. ISSN 13594311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.071.
- X. Li and C. Zou. Thermo-physical properties of water and ethylene glycol mixture based SiC nanofluids : An experimental investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101:412–417, 2016. ISSN 0017-9310. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.089.
- T. Luo, X. Wei, X. Huang, L. Huang, and F. Yang. Tribological properties of Al₂O₃ nanoparticles as lubricating oil additives. *Ceramics International*, 40(5):7143–7149, 2014. ISSN 02728842. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.12.050.
- H. K. D. Mohammad and N. E. Mohsen. Experimental investigation of the effect of nanoparticle size on thermal conductivity of in-situ prepared silica–ethanol nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 77: 148–154, 2016. ISSN 07351933. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.08.001.
- G. A. Oliveira, E. M. Cardenas C., and E. P. Bandarra F. Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 2016. ISSN 13594311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.086.
- V. M. V. Padmanabhan and S. Palanisamy. The use of TiO₂ nanoparticles to reduce refrigerator irreversibility. *Energy Conversion and Management*, 59:122–132, 2012. ISSN 01968904. doi: 10.1016/j.enconman.2012.03.002.
- R. K. Sabareesh, N. Gobinath, V. Sajith, S. Das, and C. Sobhan. Application of TiO₂ nanoparticles as a lubricant-additive for vapor compression refrigeration systems – An experimental investigation. *International Journal of Refrigeration*, 35(7):1989–1996, 2012. ISSN 01407007. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.07.002.
- M. Shanbedi, S. Zeinali Heris, and A. Maskooki. Experimental investigation of stability and thermophysical properties of carbon nanotubes suspension in the presence of different surfactants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(2):1193–1201, 2015. ISSN 15882926. doi: 10.1007/s10973-015-4404-8.
- L. S. Sundar, E. Venkata Ramana, M. K. Singh, and A. C. M. Sousa. 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*, 56:86–95, 2014. ISSN 07351933. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.06.009.
- L. S. Sundar, K. Sharma, M. K. Singh, and A. Sousa. Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(August 2016):185–198, 2017. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.108.
- N. Usri, W. Azmi, R. Mamat, K. A. Hamid, and G. Najafi. *Thermal Conductivity Enhancement of Al₂O₃ Nanofluid in Ethylene Glycol and Water Mixture*, volume 79. Elsevier B.V., 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.509.
- B. X. Wang, L. P. Zhou, and X. F. Peng. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14):2665–2672, 2003. ISSN 00179310. doi: 10.1016/S0017-9310(03)00016-4.
- D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, and K. Zhang. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*, 7(2):141–150, 2009. ISSN 16742001. doi: 10.1016/j.partic.2009.01.007.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.