

ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM NANOLUBRIFICANTES ADITIVADOS COM NANOPARTÍCULAS DE IN.

E.H.V. Sousa, eduardo.sousa@ifal.edu.br¹
F.A.O. Fontes, franciscofontes@uol.com.br³
E.E.B. Almeida, evertelvis@gmail.com^{1,2}

¹Instituto Federal de Alagoas – IFAL, Coruripe, AL, Brasil,

²Estácio FIR – Recife, PE, Brasil.

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Natal, RN, Brasil.

Resumo: Nos últimos anos alguns estudos realizados apontam que a adição de uma pequena fração volumétrica de nanopartículas (NPs) em óleos convencionais estabelece uma melhoria significativa na performance das propriedades térmicas dos fluidos, embora em alguns compostos gerados a partir da adição de NPs a baixa estabilidade mecânica e o desempenho tribológico, tem inviabilizado a sua utilização. Assim, com o este estudo, pretende-se contribuir para a redução significativa do tamanho, peso, desgaste e custos dos sistemas de transferência de calor e, deste modo, reduzir efetivamente o desgaste dos componentes móveis do compressor contribuindo desta forma para a resolução de um dos maiores entraves do mundo moderno que é à miniaturização de equipamentos desta natureza. Para estes fins, após a aquisição das NPs de índio, foram preparados três nanofluidos (NLs) distintos, adicionando-se 0,3 g/l aos óleos de compressores de refrigeração herméticos o ISO 32, ISO 68 e POE (Polioéster) e posteriormente realizando-se a desfragmentação e homogeneização do NLs. Após o processo de preparação foi mensurados os valores relativos às suas propriedades térmicas, para comprovar as propriedades requisitadas. Os NLs compostos por In foram viáveis, não se fazendo necessária a utilização de tensoativos para melhorar a sua estabilidade, pois apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios realizados, mostrando-se com propriedades de lubrificantes de extrema pressão (EP), melhorando significativamente sua condutividade térmica. Assim, torna-se viável a utilização NLs gerados a partir de NP de In na lubrificação de compressores herméticos de refrigeração.

Palavras-chave: NPs de In, condutividade, refrigeração.

1. INTRODUÇÃO.

A indústria térmica mundial procura ano após ano diminuir o tamanho dos sistemas térmicos, para torna-los mais eficientes e econômicos essa compactação está gerando calorosas discussões a cerca da utilização de sistemas e mecanismos de refrigeração onde o consumo de energia limpas e eficientes torna-se mais viável no modelo atual. Tal cenário leva a um quadro em que o incentivo a alternativas levem aos fabricantes destes equipamentos a desenvolverem sistemas compactos e econômicos, aliado a esta necessidade de compactação dos equipamentos despertou o interesse por soluções que aprimorem a transferência de calor, sem comprometer o desempenho dinâmico desses sistemas, visando este contexto surge uma nova classe de fluido com a adição de partículas sólidas aos fluidos bases, a princípio em microescala e observou-se que os compostos gerados contribuíam na melhoria do desempenho das propriedades térmicas, porém geravam problemas como entupimentos de dutos, aumento do atrito e perda de carga. Posteriormente, os esforços se concentraram na adição de partículas nanométricas, menores que as anteriores em três ordens de grandezas.

Considerando que a condutividade térmica dos NFs aumenta a habilidade destas substâncias proporcionarem uma maior troca de calor. Incrementos de materiais sólidos nos fluidos podem melhorar consideravelmente o desempenho nas referidas propriedades. Por outro lado, compostos bifásicos tendem a se separar, o que faz da estabilidade mecânica um importante fator para a comprovação da viabilidade do nanofluido (NF).

Se as NPs aumentassem a condutividade térmica do fluido em uma razão de três, sua transferência de calor seria dobrada e a potência de bombeamento não sofreria grande mudança, já que seus valores de viscosidade não geram um grande aumento. Portanto, NLs idealmente são umas classes promissoras de lubrificantes, com propriedades semelhantes ao seu óleo base, com especial destaque ao aumento em suas propriedades térmicas e tribológicas. Entretanto, pesquisas ainda revelam diversas contradições sobre alguns dos seus benefícios anunciados, principalmente na área de experimentos bifásicos.

Entre os benefícios esperados por essa nova classe de fluidos na área de transferência de calor destaca-se: aumento da condutividade térmica e de estabilidade de dispersão, ausência de entupimento em microcanais (capilares), Redução

da perda de carga, para o aumento da transferência de calor de fluidos convencionais. Se as nanopartículas aumentassem a condutividade térmica do fluido em uma razão de três, sua transferência de calor seria dobrada. Segundo Lotfizadeh e Matsoukas (2015), a forma e a estrutura sólida das NPs são importantes para o aumento da condutividade térmica. Esses autores relatam que obtiveram melhores resultados ao utilizarem NPs com superfícies alongadas.

A condutividade térmica de fluidos desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de equipamentos de transferência de calor com alta eficiência. Entretanto, de um modo geral fluidos tradicionais usados nesses equipamentos, como água, óleo ou misturas de etileno glicol são fluidos com condutividade térmica baixa Choi et al (2008).

Para Yu et al (2008) um nanofluido não é apenas uma simples mistura líquido-sólido. A sua síntese deve reunir condições como: suspensões uniformes, estáveis e duráveis e com baixa aglomeração de partículas, sendo utilizados processos físicos e químicos para a sua obtenção. Eles observaram alguns compostos que apresentaram aumento de transferência de calor na faixa de 15 e 40%.

O método convencional para aumentar a taxa de transferência de calor nestes equipamentos é aumentar a área disponível para a troca de calor com o fluido de transferência de calor. Entretanto, esse método requer um aumento indesejado no tamanho dos componentes desse sistema. Dessa maneira, existe uma necessidade urgente de novos e inovadores líquidos com a performance térmica melhorada em processos industriais (Kebinski *et al.*, 2005).

O trabalho pioneiro para a determinação da condutividade térmica em meios heterogêneos foi o de Maxwell (1873). Segundo Maxwell (1873), a resistência específica de um meio composto consistindo de uma substância de resistência específica k_l , na qual são disseminadas pequenas esferas de resistência específica k_i , na qual são disseminadas pequenas esferas de resistência específica k_p , com a razão de volume de todas as pequenas esferas para o total sendo ϕ , como é mostrado na Eq 1.

$$K = 2k_p + 2k_l + \phi(k_p - k_l)2k_p + k_l - 2\phi(k_p - k_l)k_l \quad (1)$$

Para que a ação das esferas não produza efeitos devido a interferência entre elas, o raio deve ser pequeno comparado com a distância entre as esferas. Então deve-se ter uma pequena fração em volume. Hamilton e Crosser (1962) estudaram a condutividade térmica de sistemas heterogêneos com dois componentes. Segundo os autores, a influência do formato da partícula, composição e condutividade de cada componente foi estudada. A expressão desenvolvida pelos autores é mostrada na Eq 2:

$$K = k_l[k_2 + (n-1)k_1 - (n-1)V_2(k_1 - k_2)k_2 + (n-1)k_1 + V_2(k_1 - k_2)] \quad (2)$$

onde:

K_1 = condutividade térmica da fase contínua;

K_2 = condutividade térmica da fase descontínua;

V_1 = volume da fase contínua;

V_2 = volume da fase descontínua.

Para o caso em que a relação de condutividade térmica das duas fases for menor que 100, o valor de n é 3, e para o caso em que essa relação for maior que 100, o valor de n é dado por $N = 3/\psi$, onde ψ é a esfericidade da partícula, definida como a relação entre a área superficial de uma esfera com o volume igual ao da partícula pela área superficial da partícula.

A alta condutividade térmica e o aumento esperado no fluxo crítico de calor fariam dos nanofluidos uma alternativa perfeita, em especial em dispositivos que utilizam tubos de calor como dispositivos dissipadores de calor. Do *et al* (2010), mostra um peculiar de aumento tanto da taxa de transferência de calor e de fluxo de calor crítico em tubos de calor utilizando como nanofluido água-alumina.

Fluidos refrigerantes também poderiam ter suas propriedades aumentadas com a adição de nanopartículas, melhorando a eficiência e diminuindo o consumo de energia em refrigeradores domésticos.

A proposta deste trabalho é estudar a viabilidade da utilização de nanofluidos gerados a partir de NPs de (In) em diversos tipos de óleos utilizados em compressores de refrigeração.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS:

Para a avaliação das propriedades termofísicas, onde as concentrações de NPs não ocorressem com grandes incrementos em viscosidade e reduzida sedimentação e elevada condutividade térmica. Os NLs, idealmente, encaixam-se na categoria de coloides, porém, devido à grande dificuldade de estabilização dos mesmos, geralmente são tratados como suspensões. Portanto, torna-se de extrema importância um bom conhecimento das técnicas de preparação e estabilização dos mesmos. Por serem sólidas tendem a decantar e não permanecerem suspensas no fluido.

No entanto, com esta tendência de decantação das NPs quando o fluido é preparado pelo método de dois passos e um posterior tratamento de estabilização torna-se necessário. Hwang *et al* (2008) analisou os principais métodos mecânicos de estabilização e seus parâmetros ajustáveis (Quadro 3.1).

tabela 1. Principais métodos mecânicos de estabilização

MÉTODO	Parâmetros ajustáveis
Agitador magnético	Velocidade de revolução e tempo de revolução
Banho ultrassônico	Tempo de sonificação e frequência de sonificação
Homogeneizador de alta pressão	Número de passes

O ensaio de condutividade térmica dos NL deste trabalho foi realizado através de um condutivímetro digital o qual mensura a condutividade térmica de uma substância através do método de fonte de calor linear transiente THW (*transient hot wire*). O modelo KD2 Pro (Decagon Devices.), acoplado sonda linear KS-1, apropriada para a medição da condutividade e resistividade em líquidos;

Exatidão:	±5 a ±10% Condutividade / Resistividade Térmicas, ±10% Calor específico, ±10% Difusividade térmica.
Velocidade de medida:	Tempo de leitura de 1, 2, 5 e 10 minutos dependendo do tipo de medida.
Armazenamento de dados:	4.095 leituras na memória flash.
Ambiente operacional dos sensores:	-50 a 150°C.
Incerteza de medição:	±0,01 W/m-K (5%).

Dados fornecidos pelo fabricante; Inicialmente antes do inicio de cada serie de medições se faz necessário realizar o procedimento de calibração do instrumento com uma substância padrão (glicerol), que acompanha o instrumento, comparando o resultado com o valor fornecido pelo fabricante.

O conjunto formado por PC, banho térmico, condutivímetro e termopar acoplado aos NL e óleos puros conforme se pode observar na Fig. 1.

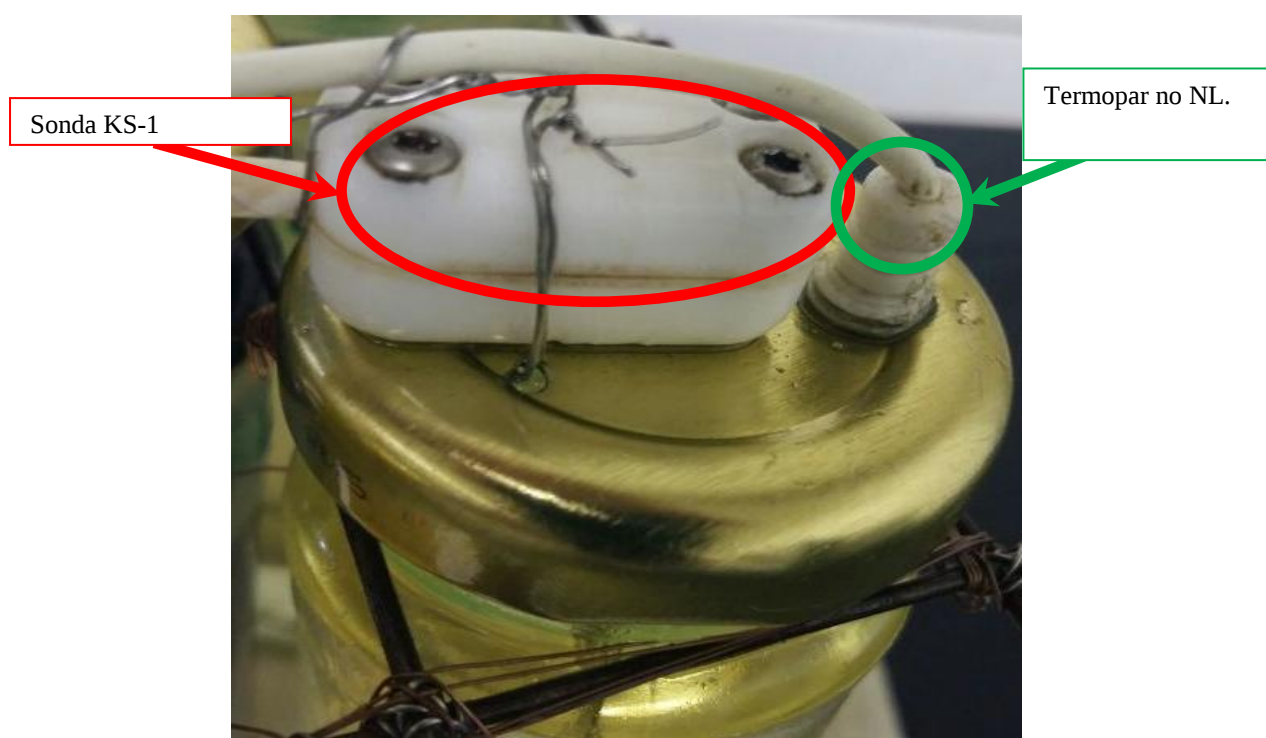


Fig. 1 – Sonda linear KS-1 e termopar acoplado a amostra de NL
Fonte: Autor.

Após a calibração do instrumento introduz-se a sonda KS-1 na substância onde se faz necessário a utilização de um banho térmico e de um termopar para verificar as temperaturas no interior do fluido. Foram realizados ensaios a 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C e 45°C.

Durante as medições o condicionador de ar do laboratório e o banho termostático foram desligados para evitar vibrações e correntes de convecção no interior do fluido, minimizando os erros de medição. As medições de condutividade foram realizadas durante o período de 1 minuto em ciclo de resfriamento do fluido, conforme sugerido pelo fabricante.

As condições e a metodologia adotada no ensaio foram repetidas para garantir a reprodutibilidade do experimento cada medição foi realizada cinco vezes, assumindo-se a magnitude baseada nos desvios em torno da média aritmética, obtido a partir da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios, cuja representação é dada por σ . Para um conjunto de n números $X_1, \dots, X_5$, com média μ , o desvio padrão σ é dado por através dos ensaios de condutividade térmica e o seu valor médio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Após a realização dos experimentos, com os devidos cuidados de depuração dos resultados e procedimentos executados de modo a garantir a repetitividade dos ensaios aqui demonstrados, segue os dados encontrados onde foram registrados e serão apresentados nas seções a seguir.

Os valores quantificados do $\ln$ em diversos óleos e os seus compostos de NLs estudados com a um incremento na condutividade térmica, a qual será apresentada através dos gráficos apresentados nas Fig 2, 3 e 4.

Com o óleo ISO68 foi obtido um incremento na condutividade térmica de aproximadamente 38,3% tendo um excelente resultado conforme pode ser evidenciado através da Fig 2.

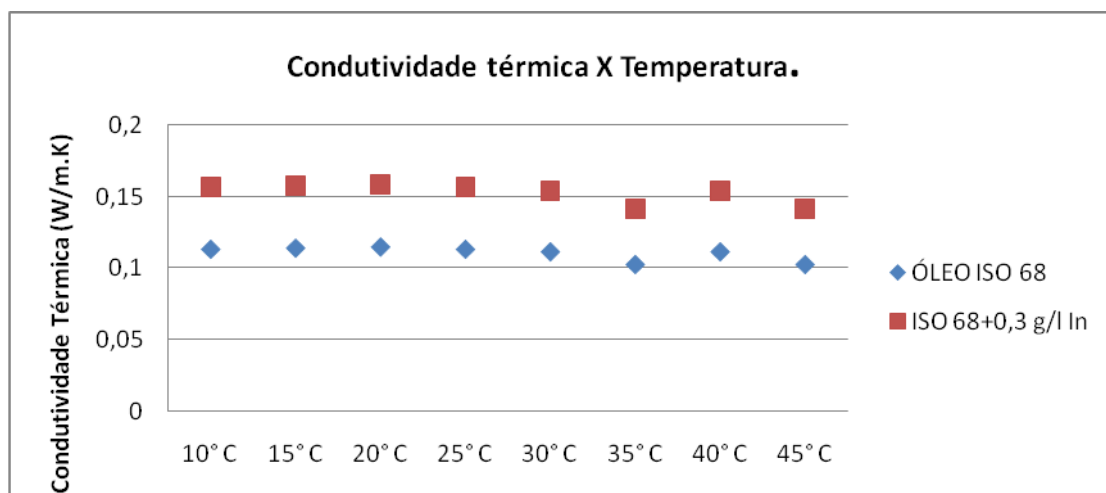


Fig 2. Condutividade Térmica (W/m.K) x Temperatura (°C) do ISO68 e ln.

Com o óleo ISO32 foi obtido um incremento na condutividade térmica de aproximadamente 27,7% tendo um bom resultado conforme pode ser evidenciado através da Fig 3.

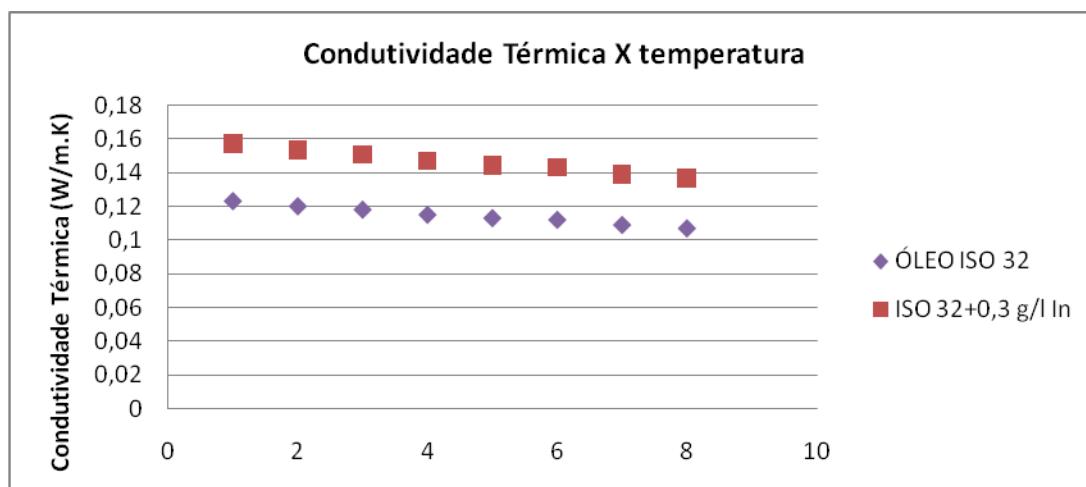


Fig 3. Condutividade Térmica (W/m.K) x Temperatura (°C) do ISO32 e ln.

Com o óleo POE foi obtido um ganho na condutividade térmica de aproximadamente 35,6% tendo um resultado satisfatório conforme pode ser evidenciado através da Fig. 4.

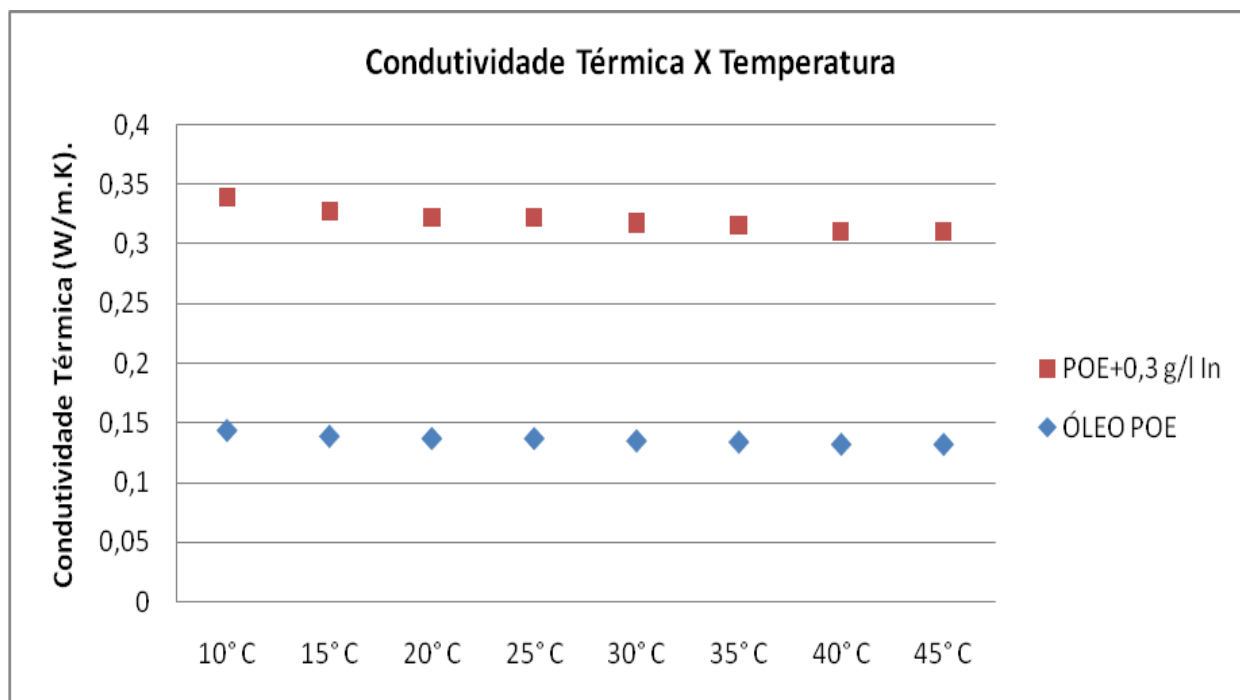


Fig 4. Condutividade Térmica (W/m.K) x Temperatura (°C) do POE e In.

Os NLs mostraram melhor condutividade térmica em todos os óleos analisados e em todas as faixas de temperaturas, enquanto nas amostras de NPs de In com os óleos ISO68 e POE obtiveram os melhores resultados, tendo um ganho de aproximadamente 38 e 35% respectivamente.

Os resultados encontrados para as propriedades termofísicas de condutividade térmica dos compostos analisados indicam que com uma fração de 0,033% em peso de NP de In pode-se aumentar o índice de condutividade térmica em cerca de 40 % em alguns compostos analisados, onde as concentrações em volume de NPs influem de forma significativa no aumento da condutividade térmica, obtendo um ganho em condutividade maior que o esperado em todos os óleos investigados.

4. CONCLUSÕES.

Os resultados encontrados da condutividade térmica dos compostos analisados indicam que com uma fração de 0,033% em peso de NP de In pode-se aumentar o índice de condutividade térmica em cerca de 40 % em alguns compostos analisados.

Assim conclui-se que o NL composto por 0,3 g/L de In, em todos os óleos de refrigeração investigados são considerados viáveis em aplicações de lubrificação em componentes de sistemas térmicos e contribuem com o melhor desempenho destes sistemas.

Os NL estudados apresentou um grande potencial de melhorar processos de transferência de calor. Isto porque a aditivação das NP de In aumenta a condutividade térmica do NL. Onde as concentrações em volume de NPs influem de forma significativa no aumento da condutividade térmica do NL.

E com a interação dos NL com os fluidos refrigerantes, pode-se aliar ao aumento da vida útil dos sistemas de refrigeração, os tornando mais compactos e eficientes, tendo uma menor geração de calor, considerando que o desgaste resultante causará menos trabalho efetuado pelo compressor, ocasionando assim em uma menor perda de eficiência.

Pode-se destacar que após os ensaios feitos os NL compostos de óleos ISO32 obtiveram os resultados relativos a condutividade térmica com incremento de 27,7%, sendo este um lubrificante que é utilizado com fluidos de refrigeração da classe R600a. Os NLs utilizados com os óleos ISO68 e POE são compatíveis com os fluidos compostos de CFC (Cloro Fluor Carbono) que devem deixar o mercado, pois são agressivos ao meio ambiente.

Particularmente, o efeito do movimento Browniano vem gerando trabalhos que confrontam teorias para explicar se realmente há ou não influência desse efeito no aumento da condutividade térmica dos NFs. De uma maneira geral, as observações experimentais permitem afirmar que a suspensão coloidal de NPs aumenta de maneira significativa as propriedades termofísicas do fluido base, e que esse aumento é conseguido com uma pequena porcentagem em volume de NPs. Além disso, os trabalhos apresentados demonstram que a técnica do fio quente tem sido largamente utilizada para a determinação da condutividade térmica dos NFs.

5. REFERÊNCIAS

- Choi, is., Jung, j.y. lubrication characteristics of a rotary compressor used for refrigeration and airconditioning systems (the influence of alternative refrigerants). *journal of mechanical science and technology* 24 (4) (2010) 851-856.
- Chandrasekar, M., Suresh, S., Chandra Bose, A., 2010. Experimental investigations and determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid. *Exp. Therm. FluidSci.* 34, 210 - 216.
- Dagilis, e., Vaitkus, l. experimental investigations and analysis of compressor's friction losses. *mechanika* nr.5 (79) 28-35. 2009.
- Duangthongsuk, W., Wongwises, S., 2009. Effect of thermophysical properties models on the predicting of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid. *Int. Commun. Heat Mass* 35, 1320 -1326.
- Do KH, HA HJ, Jang SP. Thermal resistance of screen mesh wick heat pipes using the water-based Al₂O₃ nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53(25-26), pp. 5888-5894, 2010
- Gagg e Lewis, p.r. wear as a product failure mechanism – overview and case studies. *engineering failure analysis* 14 (2007) 1618-1640.
- Hwang Y, Lee J-K, Lee J-K, et al. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. *Powder Technology*; vol. 186(2), pp. 145-153, 2008.
- Jang S, Choi Sus, Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity, *Journal of Heat Transfer*, vol. 129(5), pp.617, 2007
- Kebllinski, P., Eastman, J. A., Cahill, D. G., 2005. "Nanofluids for Thermal Transport", *Materials Today*, June, pp.36-44.
- Li X, Zhu D, Wang X., Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions, *Journal of colloid and interface science*, vol. 310(2), pp: 456-463, 2007.
- Lotfizadeh, S. Matsoukas, T. 2015. Effect of nanostructure on thermal conductivity of nanofluids. *Jornal of nanomaterials*
- Murshed S, Leong K, Yang C, Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review, *Applied Thermal Engineering*, vol. 28(17-18), pp. 2109-2125, 2008
- Murshed S, Leong K, Yang C. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 47(5), pp. 560-568, 2008.
- Prata, a.t., Barbosa Jr.,J.r. role of the thermodynamics, heat transfer and fluid mechanics of lubricant oil in hermetic reciprocating compressors. *heat transfer engineering* 30 (7) (2009) 533– 548.
- Saidur R, Leong KY, Mohammad H , A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1646-1668, 2011
- Sariibrahimoglu, K., Kizil, h., aksit, m.f., efeoglu, i., kerpicii, h. effect of r600a on tribological behavior of sintered steel under starved lubrication. *tribology international* 43 (2010) 1054–1058.
- Timofeeva, E.V., Yu, W., France, D.M., Singh, D., Routbort, J.L., 2011. Nanofluids for heat transfer: an engineering approach. *Nanoscale Res. Lett.* 6, 182.
- Yu, W., France, D.M., Routbort, J.L., Choi, S.U.S., 2008. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Tran. Eng.* 29, 432 - 460.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal de Alagoas o apoio e incentivo ao trabalho.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

STUDY OF THERMAL CONDUCTIVITY IN NANOLUBRICANTS ADDITIVATED WITH NANOPARTICLES OF IN.

E.H.V. Sousa, eduardo.sousa@ifal.edu.br¹
F.A.O. Fontes, franciscofontes@uol.com.br³
E.E.B. Almeida, evertelvis@gmail.com^{1,2}

¹Instituto Federal de Alagoas – IFAL, Coruripe, AL, Brasil,

²Estácio FIR – Recife, PE, Brasil.

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Natal, RN, Brasil.

Abstract. In recent years some studies have shown that the addition of a small volumetric fraction of nanoparticles (NPs) in conventional oils establishes a significant improvement in the performance of the thermal properties of the fluids, although in some compounds generated from the addition of NPs to low mechanical stability and tribological performance, has made their use unfeasible. Thus, with this study, it is intended to contribute to the significant reduction of size, weight, wear and costs of heat transfer systems and thereby effectively reduce the wear of the compressor's mobile components thereby contributing to the resolution of one of the major obstacles of the modern world to the miniaturization of such equipment. For these purposes, after the acquisition of the Indian NPs, three different nanofluids (NLs) were prepared, with the addition of 0.3 g/l to ISO 32, ISO 68 and POE (Polioester) hermetic refrigeration compressors, and subsequently the defragmentation and homogenization of the NLs. After the preparation process, the values relative to its thermal properties were measured, in order to prove the required properties. The NLs composed of In were viable and did not require the use of surfactants to improve their stability, since they presented satisfactory results in the tests carried out, showing with properties of extreme pressure lubricants (EP), significantly improving its thermal conductivity. Thus, it becomes feasible to use NLs generated from NP of In in the lubrication of hermetic refrigeration compressors.

Keywords: NPs of In, conductivity, refrigeration.