

ESTUDO DA VISCOSIDADE DE NANOFLUIDOS ADITIVADAS COM NANOPARTÍCULAS DE ÍNDIO EM ÓLEO LUBRIFICANTE DE REFRIGERAÇÃO.

E.H.V. Sousa, eduardo.sousa@ifal.edu.br¹
F.A.O. Fontes, francisfontes@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: Atualmente a indústria procura reduzir o tamanho dos sistemas térmicos, para torná-los mais eficientes e econômicos com isso gera inúmeras discussões a cerca da utilização de sistemas e mecanismos de refrigeração onde o consumo de energias limpas e eficientes se faça 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, econômicos e eficientes. A adição de nanopartículas (NPs) ao óleo base tem a tendência predominante de aumentar a viscosidade dinâmica do composto, mas esse resultado sofre considerável influência da temperatura do meio e o seu valor tem expressiva redução para temperaturas elevadas. O conhecimento da viscosidade do composto é fundamental para o estudo dos efeitos positivos desta aditivação contribuindo para tanto a transferência de calor e também para a queda de pressão nos sistemas térmicos. Para estes fins, após a aquisição das NPs de In, foram preparados três nanolubrificantes (NLs) distintos, adicionando-se 0,3 g/L aos óleos de compressores de refrigeração herméticos o ISO68, ISO32, e o Polioester (POE). Após o processo de preparação foram realizados os ensaios cronológicos de sedimentação e o estudo da viscosidade dinâmica através de reômetro e banho termostático para garantir e comprovar a eficácia da aditivação. Os NLs compostos por In foram viáveis, apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios realizados, mostrando-se com propriedades de lubrificantes de extrema pressão (EP). 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, reômetro, viscosidade dinâmica..

1. INTRODUÇÃO.

A adição de nanopartículas (NPs) ao óleo base tem a tendência predominante de aumentar a viscosidade dinâmica do composto, mas esse resultado sofre considerável influência da temperatura do meio e o seu valor tem expressiva redução para temperaturas elevadas. O conhecimento da viscosidade do composto é fundamental para o estudo do efeito tribológico, para a taxa de transferência de calor e também para a queda de pressão nos sistemas térmicos.

A viscosidade do óleo tem um papel imprescindível no perfil de desgaste de superfícies em contato deslizante sob extremas condições de pressão de contato. O contato desenvolvido em um compressor alternativo é uma conexão conforme entre o pistão de liga de alumínio fundido ou ferro fundido e a camisa de ferro fundido ou alumínio. Sob operação normal (compressor em funcionamento contínuo), as condições são semelhantes às da lubrificação hidrodinâmica, mas sob condições de partida/parada a condição é semelhante à lubrificação limite. Assim, a viscosidade do óleo se torna uma preocupação preliminar para projetistas de compressores e lubrificação. Viscosidades mais elevadas proporcionam um regime de lubrificação hidrodinâmica, mas podem afetar a eficiência do sistema devido ao aumento de trabalho no compressor Ciantar *et al.*, (2000).

Deste feita o óleo de refrigeração tem a função preponderante de proporcionar uma lubrificação adequada (condição hidrodinâmica) e a compatibilidade com o fluido refrigerante é crucial para a eficiência energética, confiabilidade e durabilidade dos sistemas de refrigeração. O papel da lubrificação está intimamente relacionado com a viscosidade do lubrificante. Operando abaixo de valores mínimos ou acima de valores máximos para uma aplicação específica, pode-se resultar em mau funcionamento relacionado ao atrito e consequente desgaste destes sistemas. Arelado a isto, a desempenho dos compressores alternativos é influenciada pelas perdas mecânicas. Em compressores herméticos, perdas mecânicas são as perdas por atrito nos mancais, que são usados para suportar partes móveis.

Nos compressores de sistemas de refrigeração, o calor é gerado principalmente devido ao calor da compressão e ao atrito entre as peças deslizantes. Outra fonte de calor, mas de importância secundária, é causada pelo acionamento do motor elétrico. Em compressores herméticos o lubrificante que circula dentro da carcaça age como um “distribuidor de calor”, absorvendo calor de regiões à alta temperatura de serviço e dissipando em zonas de menor temperatura.

Para o regime de lubrificação elastohidrodinâmica (EHD) a característica é a pressão transmitida pelo fluido que é elevada o suficiente deformando elasticamente os corpos. O corpo é pressionado contra o fluido, com uma intensidade tal que causa a deformação elástica do corpo e do contra corpo. Nessas condições, a viscosidade do fluido aumenta, conforme aumenta a carga normal. Segundo Bhushan (2001), as características desse regime dependem da rugosidade da superfície, da pressão do filme fluido, da carga normal, da dureza e da rigidez das asperezas, entre outros aspectos.

A diferença entre EHD e a lubrificação hidrodinâmica é que no regime de lubrificação elastohidrodinâmica ocorre deformação elástica das superfícies em contato, o contato é não conforme e o regime de lubrificação hidrodinâmica não ocorre essa deformação elástica entre as superfícies e o contato é conforme (Queiroga, 2010). Além disso, com o aumento da tensão de contato, aumenta a viscosidade do filme. É importante destacar que, mesmo em condições de EHD, pode ocorrer a formação de um filme fluido pleno de lubrificante que evita, efetivamente, o contato entre as asperezas das superfícies opostas.

Segundo Lin et al (2004), a lubrificação elastohidrodinâmica é mais difícil de formar um filme completo, pois as superfícies não são conformes e tendem a expelir o lubrificante ao invés de permitir a sua entrada. Para os mancais de deslizamento, a pressão atinge 6 MPa e não se beneficia com o fenômeno do aumento da viscosidade.

Para oferecer outras características de desempenho e proteção, são adicionados às bases lubrificantes alguns componentes químicos que são chamados de aditivos. Os aditivos mais usados são os antioxidantes e os agentes Extrema pressão (EP). Os agentes EP são aditivos que reagem quimicamente com a superfície metálica e formam uma película que reduz o atrito. Alguns tipos de agentes EP são o enxofre, o chumbo, o cloro e o fósforo. Os aditivos de EP impedem as condições de adesão causadas pelo contato metal-metal diretamente entre as partes sob altas cargas Xue *et. al.*, (1997). Contudo, estes aditivos estão tendo restrições quanto ao seu uso devido aos seus impactos ambientais.

As bases lubrificantes são selecionadas de acordo com sua capacidade de: formação de filme deslizante e protetor das partes móveis; resistir às elevadas temperaturas e presença de oxigênio, os quais alteram suas propriedades; resistir a choques e cargas mecânicas, sem alterar seu poder lubrificante; remover calor dos componentes internos do equipamento Dowson (1998).

Neste contexto, as NPs surgem como uma alternativa importante para substituir os aditivos EP convencionais, mesmo que estes sejam eficientes, as NPs é uma alternativa para que além de minimizar o atrito e o desgaste, possa aumentar o coeficiente convectivo e a troca de calor entre os corpos, por outro lado pode ser uma forma de alternativa ambientalmente adequada. De acordo com Xue *et. al.* (1997), os resultados de várias pesquisas mostram que as NPs inorgânicas podem se depositar na superfície de contato e melhorar as propriedades tribológicas do óleo básico. Xue *et. al.* (1997) e Dong *et. al.* (2000) também observaram que as NPs exibem boa adesão e características de redução de desgaste, mesmo em concentrações abaixo de 0,2% em peso.

Salinas (2005) comenta que os modelos propostos para estimar a viscosidade dos (NFs) são derivados do modelo de Einstein que utilizou as equações de Navier-Stokes, para obter a viscosidade efetiva de um fluido em um escoamento incompressível. Neste modelo as partículas são esferas rígidas (θv), sem interações, e bem maiores do que as moléculas do solvente. Neste modelo a viscosidade do (NF) e a do fluido base, são representadas respectivamente por (μ_{nf}) e (μ_f) se relacionam através da eq. (1):

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\theta v)\mu_f \quad (1)$$

A viscosidade do fluido tem especial importância em equipamentos que transferem calor por convecção. A perda de carga associada a fluidos de altas viscosidades é um fator limitante que resulta muitas vezes na utilização de fluidos “pobres” termicamente.

As viscosidades para os óleos sintético e mineral têm valores menores em relação às demais viscosidades quando estas são a 40 °C e 100 °C. Isso se explica devido os lubrificantes vegetais terem uma viscosidade aumentada com o tamanho da cadeia do éster (número de átomos de carbono) e com o aumento do grau de insaturação nela existentes. Isto torna os biolubrificantes mais viscosos que os óleos minerais e sintéticos quando submetidos a altas temperaturas.

Quando os óleos sintéticos e minerais são aquecidos a 100 °C resulta em uma diminuição da viscosidade devido às classes desses óleos lubrificantes apresentarem parâmetros reológicos e composição química diferente dos demais óleos lubrificantes.

Deve-se considerar que a viscosidade é uma característica fundamental para uma boa lubrificação. Na lubrificação limítrofe, entretanto, os óleos vegetais tiveram valores de viscosidades superiores aos óleos mineral e sintético, mesmo assim, o melhor desempenho de menor atrito e desgaste foi com os óleos de menor viscosidade.

Para o índice de viscosidade, é um número que indica o grau de mudança da viscosidade de um óleo a uma dada temperatura, todos os óleos lubrificantes obtiveram bons índices, valores adequados para um lubrificante de boa qualidade. Um alto índice de viscosidade indica uma menor mudança na viscosidade com o aumento da temperatura e um baixo índice ocorre o contrário.

A perda de carga associada a fluidos de altas viscosidades é um fator limitante que resulta muitas vezes na utilização de fluidos “pobres” termicamente. Os NFs apresentam comportamento não-newtoniano, segundo alguns autores, e newtoniano, segundo outros autores. O que se sabe, no entanto, é que a viscosidade está fortemente associada

à concentração de NPs e tal dependência não aparenta ser linear. NFs com 5% de concentração, por exemplo, apresentaram um aumento na faixa de 80% em viscosidade enquanto que em concentrações mais baixas, como a de 1%, a variação da viscosidade não passa de 20% (Fig.1).

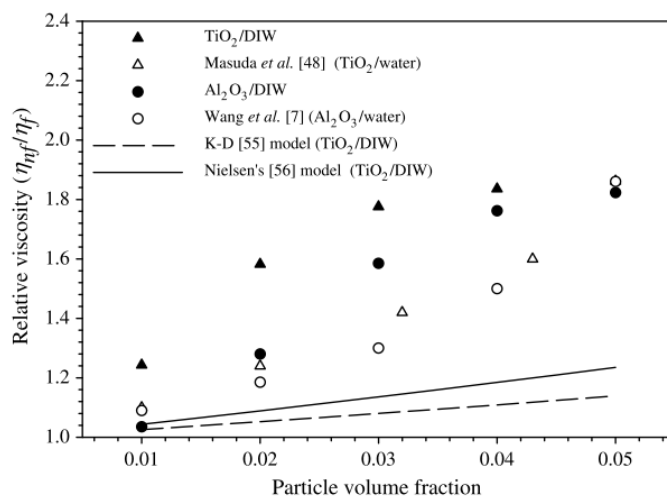


Fig. 1 – Viscosidades relativas de nanofluidos em função de fração de volume.
Fonte: Musrshed et al (2008).

Yuh-Yih *et al* (2011) comentam que normalmente a viscosidade aumenta à medida que o tamanho das partículas diminui e quando a fração de volume aumenta, mesmo se, por vezes, um comportamento diferente é observado.

Os lubrificantes sintéticos têm excelente resistência ao calor e à oxidação, além de ter uma vida em serviço bem prolongada, têm maior índice de viscosidade inicial e repartição menor da viscosidade em relação aos tradicionais lubrificantes industriais. As moléculas que compõem os óleos têm tamanho uniforme e estabilidade de viscosidade bem superior.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS:

Os ensaios de viscosidade dinâmica foram realizados em Laboratório com temperatura controlada, através de um Reômetro, do tipo Brookfield Engineering Labs Digital Rheometer Model DV-III, com o funcionamento de um cilindro rotativo com geometria Spindle LV-1, acoplado a um banho termostático TC-102, separada de uma parte fixa pelo líquido de arrefecimento sendo este, interligado a um banho térmico e um PC. Medindo desta forma por meio da velocidade angular do Spindle no NL, sendo esta composta de uma parte móvel estando este interligado a um PC com o software RHEO V2.7.

Este experimento ocorreu nas amostras no óleo ISO68, ISO32 e POE puro e com os NLs preparados com 0,3 g/L de In. A incerteza do reômetro é de $\pm 1\%$ do fundo de escala, para qualquer geometria do agitador (*spindle*) e velocidade. As medições aconteceram nos intervalos entre 10°C a 45°C com incrementos de 5°C. Cada medição foi realizada cinco vezes, com o intuito de garantir a reprodutividade 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 $X_1, \dots, X_n$, com média μ , o desvio padrão σ é dado por através dos ensaios de viscosidade dinâmica com o seu valor médio.

Foram utilizadas 150 ml das amostras (Óleo ISO68, ISO32 e POE) e a estes foram aditivados 0,3 g/L de NPs de In, com gradientes de temperatura 10 °C a 45 °C com incrementos de 5°C. O índice de viscosidade é obtido pela norma ABNT NBR-14358, cujo cálculo é baseado nos valores da viscosidade cinemática às temperaturas de 10 °C a 45 °C. Por recomendação do fabricante do equipamento deve-se evitar fortes aquecimentos, o que foi reforçado pelo fato de que em ambas as referências consultadas (Ozisik, 1990 e Incropera, 2001).

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 seguintes.

Quando se faz testes de acordo com alguma especificação ou procedimento existente, deve-se usar o *spindle* e a velocidade indicada. Quando se trabalha com um teste comum, o melhor método para a seleção da velocidade e tipo de *spindle* é a tentativa e erro. O objetivo é alcançar uma leitura de torque entre 10 e 100% do torque aplicado pelo motor. Este torque é função do arrasto viscoso da amostra contra o cone, e a leitura da porcentagem de torque é feita diretamente no através software RHEO V2.7. À medida que o torque se aproxima de 100% a incerteza da medida melhora. Se a leitura for menor que 10%, deve-se selecionar uma velocidade maior e/ou um *spindle* maior.

A faixa de viscosidade do mensurada pelo reômetro e dada em (em centipoise ou Cp) é determinada pela velocidade de rotação, o tamanho e formato do *spindle*, o recipiente na qual o *spindle* está rodando, e a escala total de torque da mola calibrada.

A Figura 2 (a) apresenta o detalhe do spindle (cone) fixado ao reômetro. A Fig. 2(b) mostra o copo do reômetro, com as mangueiras nas quais água circula para manter a amostra em uma temperatura uniforme. Observa-se também nesta figura o cabo pela qual se faz a medida de temperatura da amostra. A Fig. 2(c) apresenta o banho termostático do reômetro.

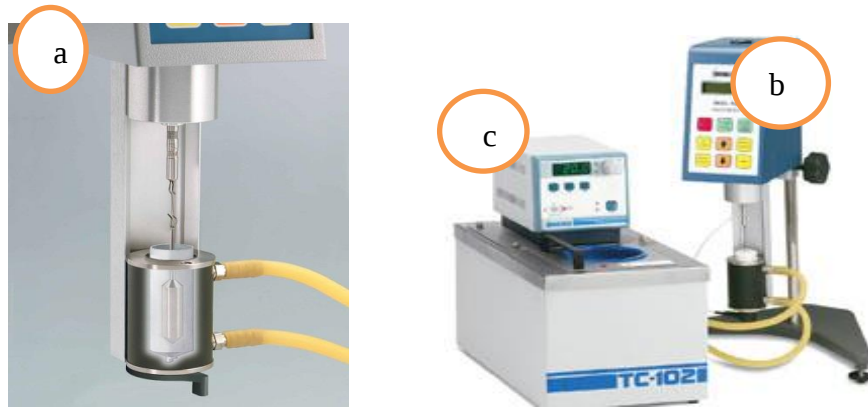


Fig. 2. Conjunto Reômetro. (a) apresenta o detalhe do spindle (cone); (b) Reômetro montado com mangueiras; (c) banho termostático.

Para a viscosidade, foram feitos testes respeitando as recomendações a Norma Brasileira NBR 14358 de 2005, baseada no método ASTM 2270, a qual indica toda a metodologia para se obter o índice de viscosidade de um produto dados do fabricante quanto à porcentagem de torque, que deve se situar entre 10 e 100%. Os testes foram feitos com a variação de taxa de deformação de modo que o torque ficasse dentro da faixa estabelecida. Além disso, os testes foram feitos em uma faixa de temperatura que variou em função das características das amostras utilizadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Após a realização dos ensaios, percebe-se que os valores da viscosidade dinâmica dada em Pascal dos nanofluidos são aproximadamente iguais ao do óleo puro, principalmente para aplicações em temperaturas a partir de 35°C.

Assim, consideramos esse resultado satisfatório, pois a queda de viscosidade gera problemas tribológicos nos componentes dos sistemas térmicos e uma maior viscosidade pode causar baixa eficiência nos mesmos.

A mensuração da variação para viscosidade dinâmica realizada para os ensaios realizados com a nanopartículas de Índio com os óleos ISO 68, ISO 32 e o POE com as respectivas concentrações de nanopartículas no óleo é insignificante se comparado com o óleo puro, como pode ser observado na fig. 3.

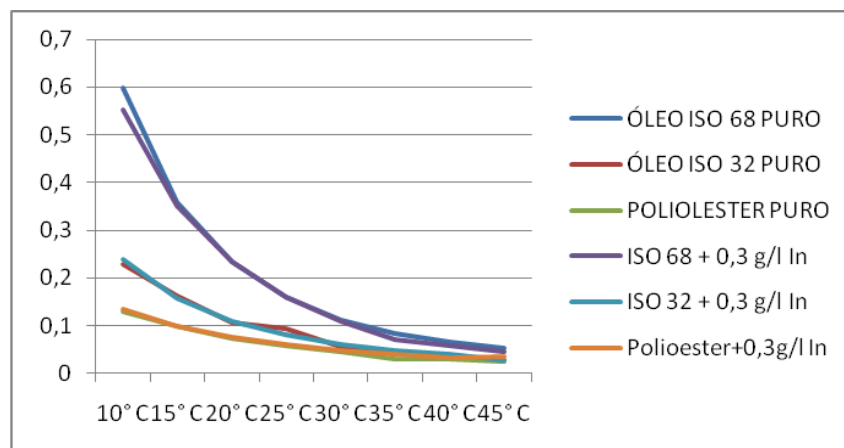


Fig. 3 – Viscosidade dinâmica dos nanofluidos estudados.

Os valores de viscosidade dinâmica permaneceram praticamente inalterados em relação ao lubrificante aditivado com NP de In, fato este que demonstrou que a adição de 0,033% em massa de NPs de In tendo uma pequena alteração no comportamento reológico, sendo considerado desprezível em temperaturas a partir de 35°C. Assim, consideramos esse resultado satisfatório, pois a queda de viscosidade gera problemas tribológicos nos componentes dos sistemas térmicos e uma maior viscosidade pode causar baixa eficiência nos mesmos.

As incertezas das medidas de viscosidade foram calculadas de acordo com as instruções do fabricante, ou seja, 1% do fundo de escala. Para cada taxa de deformação, o instrumento determina automaticamente o fundo de escala, baseado no *spindle* utilizado.

As incertezas para as médias das viscosidades foram calculadas de acordo com a Segunda Edição Brasileira do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, em função das incertezas obtidas para a viscosidade em cada taxa de cisalhamento.

4. CONCLUSÕES.

Os resultados encontrados para a viscosidade mecânica indicam que o comportamento do óleo ISO68, ISO32 e POE e nos compostos utilizando as NPs de In investigados apresentam um pequeno incremento em todas as faixas de temperaturas, sendo assim, não altera as características reológicas dos NL estudados, visto que a alteração nas composições reológicas as quais iriam implicar diretamente na capacidade de formação de filme deslizante e protetor das partes móveis onde este deve resistir às elevadas temperaturas e presença de oxigênio, os quais alteram suas propriedades, sendo o NL capaz de resistir a choques e cargas mecânicas, sem alterar seu poder lubrificante, promovendo a remoção de calor dos componentes internos do equipamento o que era esperado, pois a estes foram adicionados apenas 0,033 % em massa de nanopartículas as quais irão contribuir para o melhor desempenho dos NL pesquisados.

5. REFERÊNCIAS

- Bair, S.; Winer, W.O. "The High Pressure Shear Stress Rheology of Liquid Lubricants". ASME Journal of Tribology, vol. 114, 1992.
- Bhushan, B. Modern Tribology Handbook. Principles of Tribology. United States: CRC press LLC. Vol. 1, 2001.
- Brock, J.; Nogueira, M. R.; Zakrzewski, C.; Corazza, F. de C.; Corazza, M. L.; Oliveira, J. V. Experimental measurements of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 28(3): 564-570 p. 564, jul.-set. 2008.
- 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. Fluid Sci. 34, 210 - 216.
- Cheng L, Bandarra Filho EP, Thome Jr, Nanofluid Two-Phase Flow and Thermal Physics: A New Research Frontier of Nanotechnology and Its Challenges, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 8(7), pp: 3315-3332, Available at: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=15334880&volume=8&issue=7&spage=3315>.
- Ciantar, C., Hadfield, M., Swallow, A., Smith, A., The influence of POE and PVE lubricant blends within hermetic refrigerating compressors operating with HFC-134a refrigerant. Wear 241, 2000, pg 53-64.
- Dong, Junxiu., Chen, Guoxu., Qiu, Sunqing. Wear and friction behaviour of CaCO₃ nanoparticles used as additives in lubricating oils. Lubr. Sci. Chongqing, China, v.12 p.205-212, February 2000.
- Dowson D. History of Tribology (1997-1998). Professional Engineering Publishing Ltd; London and Bury St., Edmunds, UK: 1998, ISBN 1 86058070 X. DU, Y., SAMMES, N., TOMPSET, G., ZHANG, Y. Phase stability bismuth antimony oxide. Solid State Ionics, Elsevier, v.117, p. 291-299, February 1999.
- Incropera, F.P., Dewitt, D. P., 2001. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, New York.
- Lin, Y.C.; H. SO. Limitations on use of ZDDP as an antiwear additive in boundary lubrication. Tribology International. Taiwan, v.37. p.25-33, 2004. Disponível em: Y.H. Zhou, M. Harmelin, J. Bigot. Sintering behavior of ultra-thin Fe, Ni, and Fe-25wt% Ni powders. Scripta Metallurgica. France, v.23. p.1391-1396, 1999.
- Musrshed, S. M. S., Leong, K. C., Yang, C., 2008, "Enhanced Thermal Conductivity of TiO₂-water Based Nanofluids", Int. Journal of Thermal Sciences, vol 44, pp. 367-373.
- Ozisik, M.N., Orlande, H. R. B., 2000. Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications, Taylor & Francis, New York.
- Queiroga, Kayo Felipe Nunes Maia de. Tribologia. Universidade Potiguar – Unp. Cst Em Petróleo e Gás – p.7-9. Junho, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA4GYAF/tribologia>>.
- Salinas, S. R. A. (2005). Einstein e a teoria do movimento browniano (Einstein and the theory of the Brownian movement). *Revista Brasileira de Ensino da Física*, v. 27, p. 263-269.
- Yuh-Yih, Wu, Mu-Jung Kao. "Using TiO₂ nanofluid additive for lubricating oil motor." Industrial Lubrication and Tribology. Taiwan, v.63. Iss 6: p.440-445, 2011.
- Xue, Q. W. Liu, Z. Zhang. Friction and wear properties of a surface modified TiO₂ nanoparticle as an additive in liquid paraffin, Wear. China, v.213. p.29-32, 1997.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

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

STUDY OF THE VISCOSITY OF NANOFLUIDS ADDITIVATED WITH INDIAN NANOPARTICLES IN REFRIGERATION LUBRICATING OIL.

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: Currently the industry seeks to reduce the size of thermal systems, to make them more efficient and economical with this generates numerous discussions about the use of systems and mechanisms of refrigeration where the consumption of clean and efficient energies becomes viable in the current model. Such scenario leads to a framework in which the incentive to alternatives lead manufacturers of these equipment to develop compact systems, economical and efficient. The addition of nanoparticles (NPs) to the base oil has the predominant tendency to increase the dynamic viscosity of the compound, but this result suffers considerable influence of the temperature of the medium and its value has expressive reduction for elevated temperatures. The knowledge of the viscosity of the compound is fundamental for the study of the positive effects of this additive contributing to both the heat transfer and also to the pressure drop in the thermal systems. For these purposes, after the acquisition of the NPs of In, three different nanolubrificantes (NLs) were prepared, adding 0.3 g/L to hermetic refrigeration compressors oils ISO68, ISO32, and Polioester (POE). After the preparation process, the sedimentation chronological tests were carried out and the dynamic viscosity was studied through a rheometer and thermostatic bath to guarantee and prove the effectiveness of the additives. The NLs composed of In were viable, presented satisfactory results in the tests performed, showing with properties of extreme pressure lubricants (EP). Thus, it becomes feasible to use NLs generated from NP of In in the lubrication of hermetic refrigeration compressors.

Keywords: NPs off In, rheometer, dynamic viscosity.