

MEDIÇÕES DE PROPRIEDADES DE NANOFLUIDOS DE DIAMANTE  
EM ÓLEO DE TRANSFORMADOR ELÉTRICO

**Douglas Hector Fontes** – douglashfontes@hotmail.com

**Enio Pedone Bandarra Filho** – bandarra@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica

**José Roberto Camacho** – jrcamacho@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica

R2 – Refrigeração – Componentes e Equipamentos

**Resumo.** Este trabalho apresenta resultados das medições experimentais da condutividade térmica, viscosidade e rigidez dielétrica de nanofluidos de nanopartículas de diamante em óleo mineral de transformador elétrico (OTE). Para as medições da condutividade térmica dos nanofluidos utilizou-se o método transiente do fio quente (THW), para a obtenção da viscosidade dinâmica foram utilizadas as curvas de tensão-taxa de cisalhamento de cada amostra, obtidas por intermédio de reômetros de tensão controlada em uma geometria de cilindros concêntricos e finalmente, a rigidez dielétrica AC (breakdown voltage AC) dos nanofluidos foi obtida medindo-se a tensão de ruptura das amostras em um medidor de rigidez dielétrica. Os resultados experimentais das medições da condutividade térmica e viscosidade mostraram que os nanofluidos com concentrações volumétricas de 0,005% e 0,01% em OTE apresentaram melhores características térmicas. Com relação à rigidez dielétrica todos os nanofluidos levaram a uma deterioração da rigidez dielétrica do OTE.

**Palavras-chave:** Nanofluidos, diamante, condutividade térmica, rigidez dielétrica.

## 1. INTRODUÇÃO

A atual conjuntura econômica tem levado a uma necessidade no aumento da produção, de forma cada vez mais eficiente, nos mais diversos setores industriais, como na indústria de alimentos, de petróleo e de transmissão e conversão de energia elétrica. Estes setores industriais são normalmente dependentes de sistemas de troca térmica. Assim, o melhoramento na eficiência da troca térmica nos equipamentos utilizados nestes setores industriais é um dos fatores relevantes para atender a necessidade de aumento na produção. Na indústria de transmissão e conversão de energia elétrica pode-se destacar como equipamento para melhoria na eficiência o transformador elétrico. A eficiência de um transformador elétrico pode ser aumentada melhorando-se as características térmicas do óleo dielétrico utilizado no interior do transformador elétrico. Uma abordagem que tem sido utilizada para aumentar a condutividade térmica (principal propriedade na difusão de calor) de líquidos é realizar dispersão de partículas com dimensão característica de nanômetros nos mesmos. Tais dispersões têm sido denominadas como nanofluidos (Choi et al., 1995). Estas dispersões modificam as propriedades do líquido de base, conforme características das nanopartículas, líquido de base, concentração volumétrica das nanopartículas, utilização de dispersantes, dentre outros fatores. O aumento na eficiência do óleo utilizado em transformador elétrico é dependente de três principais propriedades: rigidez dielétrica, que representa a capacidade isolante do óleo; condutividade térmica, que representa a capacidade de um material em transferir calor por difusão; e viscosidade dinâmica, propriedade que expressa difusão molecular de quantidade de movimento.

A principal função do óleo de transformador elétrico, que pode ser mineral, sintético e vegetal, é a de isolar eletricamente os componentes no interior do transformador elétrico. Assim, a rigidez dielétrica é a principal propriedade do óleo utilizado em transformador elétrico. Pesquisas têm surgido com o objetivo de aumentar a rigidez dielétrica do óleo de transformador elétrico, melhorando suas propriedades isolantes, através da dispersão de nanopartículas no mesmo. Du et al. (2012) realizaram medições de rigidez dielétrica de nanofluidos de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , com concentração volumétrica de 0,075% em óleo mineral para transformador elétrico, por meio da medição da tensão de ruptura AC. Eles obtiveram que a tensão de ruptura dos nanofluidos foi de 80,9 kV enquanto que para o óleo mineral a tensão de ruptura foi de 67,9 kV, indicando que a utilização destas nanopartículas no óleo mineral aumenta a rigidez dielétrica do mesmo. Além disso, os autores observaram que a dispersão de partículas semicondutoras ( $\text{TiO}_2$ ) em óleo mineral diminui a velocidade de propagação da corrente elétrica, reduzindo o tempo para que ocorra a ruptura do dielétrico. Resultado que os autores têm explicado pelo fato das partículas semicondutoras atuarem como armadilhas para os elétrons, retardando seu deslocamento no meio, melhorando assim as características de isolamento do óleo. Lee e Kim (2012) realizaram testes para estimar a rigidez dielétrica de nanofluidos à base de óleo com partículas ferro magnéticas com diâmetro de cerca de 10 nm, com uso de surfactantes para tornar a dispersão estável. Os autores obtiveram um aumento de mais de duas vezes utilizando nanopartículas ferro magnéticas, sendo que, utilizando um campo magnético externo, houve um acréscimo de mais 30% ao incremento obtido com a dispersão das nanopartículas. Este fato também pode ser explicado pelo fato das nanopartículas atuarem como aprisionadores de elétrons reduzindo a velocidade dos mesmos na passagem de corrente elétrica. Estas explicações, em certo ponto, fogem do senso comum de que partículas condutoras

em um meio dielétrico reduzem a rigidez dielétrica deste meio. Resultados similares foram encontrados por Segal et al. (2008), Hwang, Zahn e O'Sullivan (2009).

Outra importante característica que o óleo de transformador elétrico deve possuir é a de transferir de forma eficiente a energia térmica gerada na bobina e enrolamentos do transformador elétrico para o meio externo. A condutividade térmica é a propriedade que tem maior influência na capacidade de transferir calor que um dado material tem. Uma das maiores características que levou ao aumento na pesquisa sobre dispersão de nanopartículas em líquidos foi justamente o incremento atípico que tais dispersões proporcionam na condutividade térmica dos líquidos sob a perspectiva de aumento da teoria do meio efetivo (Maxwell, 1873). Diversos pesquisadores obtiveram aumentos expressivos na condutividade térmica de líquidos ao dispersar nanopartículas nos mesmos (Eastman et al. (1997), Lee; Choi; Eastman (1999), Wang; Xu; Choi (1999), Assael et al. (2004) e Murshed; Leong; Yang (2008), Branson et al. (2013)). Ettefaghi et al. (2013) mediram, utilizando o medidor KD2-Pro, a condutividade térmica de nanofluidos de MWCNT (nanotubos de carbono de parede múltipla) em óleo de motor, obtendo um aumento de cerca de 22,7% sobre a condutividade térmica do óleo puro, para uma concentração mássica de 0,5%. Os referidos autores mostraram que houve um aumento da condutividade térmica com a concentração mássica de nanopartículas, porém, tal aumento não se mostrou linear. Medidas de condutividade térmica de nanofluidos de  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $SiC$  em óleo mineral foram realizadas por Chiesa e Das (2009), que utilizaram a técnica transiente do fio quente para medir a condutividade térmica dos nanofluidos obtidos. Eles obtiveram que, exceto para os nanofluidos com nanopartículas  $SiO_2$ , a teoria do meio efetivo subestimou os incrementos na condutividade térmica com a concentração volumétrica das nanopartículas, obtendo um incremento máximo de 10% para uma concentração volumétrica de 1,0%. Explicações para o aumento na condutividade térmica, que excede as previsões da teoria do meio efetivo, estão relacionadas com efeitos na escala nanométrica, como a formação de camada interfacial, a natureza do calor na escala nanométrica, movimento Browniano e formação de aglomerações (Kebllinski et al., 2002).

Apesar de a condutividade térmica aumentar com a dispersão de nanopartículas em líquidos, deseja-se que as dispersões não tenham aumentos expressivos na viscosidade dinâmica, pois esta propriedade, que relaciona a tensão aplicada ao fluido com a taxa de deformação, quanto maior, maior é a dificuldade em escoar o fluido, que no caso de transformadores elétricos, o escoamento do óleo normalmente é induzido por desbalanço peso-empuxo (convecção natural). Ettefaghi et al. (2013) mediram a viscosidade de nanofluidos de MWCNT em óleo de motor, com concentrações mássicas de 0-0,5%. Eles obtiveram que para baixas concentrações a viscosidade dos nanofluidos foi reduzida, enquanto que para maiores concentrações a viscosidade aumentou. Eles atribuíram a redução de viscosidade para nanofluidos com baixa concentração mássica, devido a uma interposição das nanopartículas nas camadas de óleo facilitando o movimento das camadas, porém quando a concentração de nanopartículas aumenta, partículas maiores e mais largas dificultam o deslocamento das camadas de óleo. Nos experimentos realizados por Segal et al. (1998), que mediram entre outras propriedades de nanofluidos de óleo mineral-ferrofluido a viscosidade em diferentes temperaturas, não foram observadas diferenças significativas na viscosidade dos nanofluidos comparada à do óleo mineral puro.

Uma vez que a viscosidade de nanofluidos com baixas concentrações volumétricas tem se mostrado próxima à da viscosidade do fluido de base e que, como relatado, resultados promissores de condutividade térmica e de rigidez dielétrica com o aumento da concentração volumétrica para aplicações de nanofluidos de óleo como líquido de base tem sido encontrado, este trabalho apresenta resultados experimentais das medições de rigidez dielétrica, condutividade térmica e viscosidade dinâmica de nanofluidos à base de óleo mineral para transformador elétrico (OTE) com nanopartículas de diamante, que são partículas inertes, atendendo ao senso comum, de que dispersões com tais partículas poderiam elevar a capacidade isolante do OTE.

## 2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a preparação das amostras foram utilizadas nanopartículas esféricas de diamante com diâmetro de 3-6 nm e OTE como líquido de base. As nanopartículas foram obtidas da Nanostructured & Amorphous Materials, Inc. e o OTE da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU. Algumas propriedades do OTE e dos materiais das nanopartículas são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Valores típicos das propriedades do OTE e material das nanopartículas

Propriedades	OTE	diamante
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	861	3520
$\kappa$ [W/m-K]	0.157	~900
$c_p$ [J/kg-K]	1860	630
$\mu$ [Pa-s]	0.013350	****

As nanopartículas foram dispersas no OTE por meio de um homogeneizador a alta pressão, que quebra as aglomerações, pela indução de altas taxas de cisalhamento no sistema previamente misturado. Os pistões pressurizam o líquido, forçando a passagem do mesmo por estreitos canais, que conduzem o líquido a uma câmara comum, onde a velocidade do escoamento é aumentada. O processo resulta em um fluido disperso e homogêneo (Bandarra Filho et al. 2014). Na

Fig. 1 é apresentado um diagrama esquemático do processo de homogeneização a alta pressão, que pode submeter o fluido no interior do homogeneizador a uma pressão de até 800 bar.

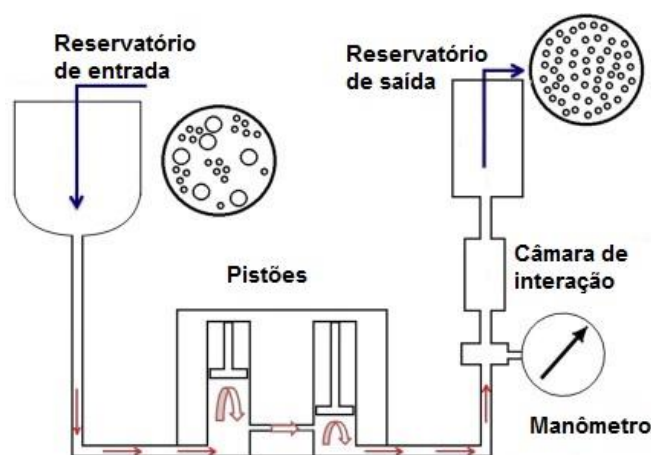


Figura 1. Diagrama esquemático do processo de homogeneização a alta pressão (adaptado de Bandarra Filho et al., 2014)

As concentrações volumétricas dos nanofluidos de diamante foram de 0,001%, 0,005% e 0,01%. Para garantir estas concentrações volumétricas, considerou-se uma perda de 10% de massa de nanopartículas devido ao processo de homogeneização, que faz com que nanopartículas fiquem retidas no interior do homogeneizador; transporte e; manuseio. Na Tab. 2 são apresentadas as denominações adotadas para as amostras de nanofluidos e as massas de nanopartículas utilizadas para um volume de 500 ml de OTE e na Fig. 2 são apresentadas as amostras em tubos de ensaio. Os nanofluidos ODI1 e ODI2 permaneceram visualmente estáveis e bem dispersos por mais 24h, enquanto que o nanofluido ODI3 não ficaram homogêneos por mais de 3 horas.

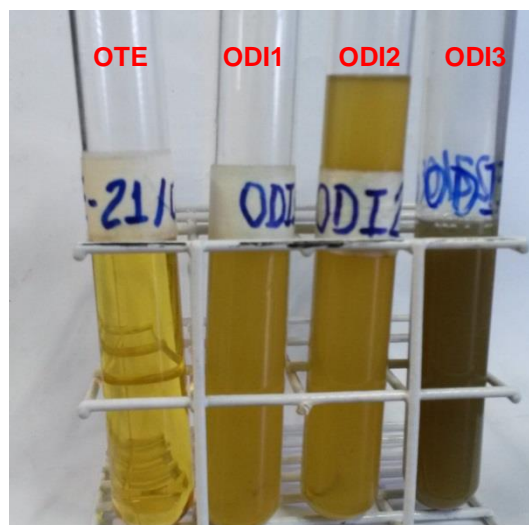


Figura 2. OTE e nanofluidos de diamante

Tabela 2. Massas de nanopartículas utilizadas na produção de nanofluidos

Amostra	Denominação	Massa utilizada ( $\pm 0.001$ ) [g]
Diamante+MO $\varphi=0.005\%$	ODI1	0.098
Diamante+MO $\varphi=0.01\%$	ODI2	0.194
Diamante+MO $\varphi=0.05\%$	ODI3	0.961

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e os métodos utilizados para obter a condutividade térmica, a viscosidade dinâmica e a rigidez dielétrica das dispersões obtidas.

### 3.1 Condutividade térmica

Para medir a condutividade térmica dos nanofluidos utilizou-se o método transiente do fio quente (Nagasaka e Nagashima, 1981), que mede a variação com o tempo da temperatura de um fio aquecido. Neste método o fio, que funciona como um dissipador de calor e medidor de temperatura é imerso no fluido a ser analisado. Na Fig. 3 é mostrada a sonda utilizada, imersa na amostra de OTE, e ao lado um copo de vidro com glicerina, que foi utilizada para calibração do equipamento, Motta (2012).

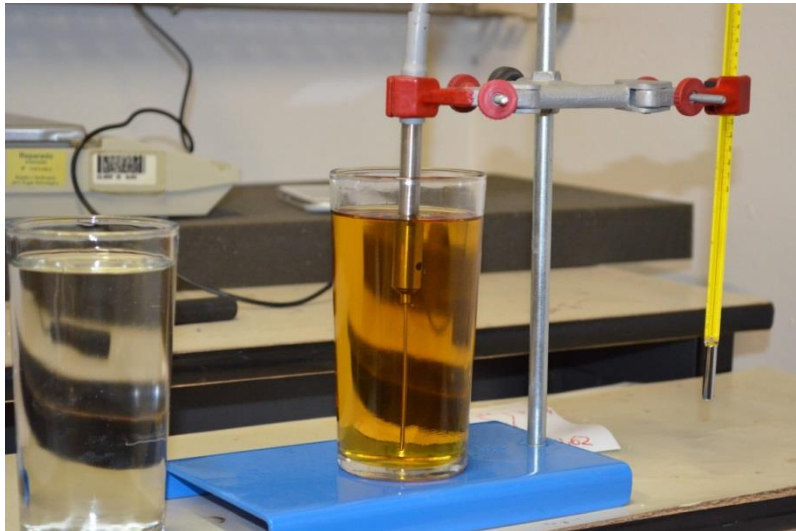


Figura 3. Vista da sonda do método transiente do fio quente imersa em OTE

A condutividade térmica do fluido é relacionada com a taxa de aumento da temperatura, que é dependente do fluido onde o fio é imerso. Assim, a condutividade térmica pode ser obtida pela Eq. (1), que é deduzida considerando que o fio é uma fonte de calor ideal imerso em um material homogêneo e isotrópico com temperatura inicial constante.

$$\kappa = \left[ \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \right] \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (1)$$

Onde  $T_2$  e  $T_1$  são respectivamente as temperaturas medidas no fio no instante  $t_2$  e  $t_1$  e  $q$  é a taxa de calor dissipada no fio.

Antes de realizar as medições da condutividade térmica das amostras, realizou-se a calibração do equipamento com um fluido com condutividade térmica conhecida, a saber, glicerina. Desta calibração obteve-se um desvio menor que 1% do valor médio das medições de condutividade térmica e o valor de referência da condutividade térmica da glicerina, na temperatura em que foram realizadas as medições. Tanto na calibração do equipamento quanto nas medições da condutividade térmica das amostras de nanofluidos, foram realizadas cinco medições de condutividade térmica à temperatura ambiente, que era em torno de 20 °C. A exatidão das medições de condutividade térmica das amostras foi considerada a determinada pelo fabricante, como sendo de  $\pm 3\% + 0,02 \text{ W/m.K}$ .

### 3.2 Viscosidade dinâmica

A medição da viscosidade foi realizada em uma geometria de cilindros concêntricos, utilizando o reômetro de tensão controlada Physica MCR 301 e 501-Anton Paar. Na Fig. 4 são apresentadas as imagens dos reômetros MCR 301 e MCR 501. As curvas do comportamento reológico das amostras foram obtidas a temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C, para uma faixa da taxa de cisalhamento de 0,001 s<sup>-1</sup> a 100 s<sup>-1</sup>. Para cada taxa de cisalhamento foi medido o torque necessário para manter a rotação relativa dos cilindros, obtendo do torque a tensão de cisalhamento à qual o fluido foi submetido, sendo possível traçar as curvas de tensão e taxa de cisalhamento, da onde se obtém as curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento de cada amostra. Com estas curvas é possível avaliar o comportamento reológico do fluido, se este é newtoniano, pseudoplástico ou dilatante. Para cada amostra foram realizados no mínimo dois testes, para verificação dos dados medidos.



(a) MCR 301

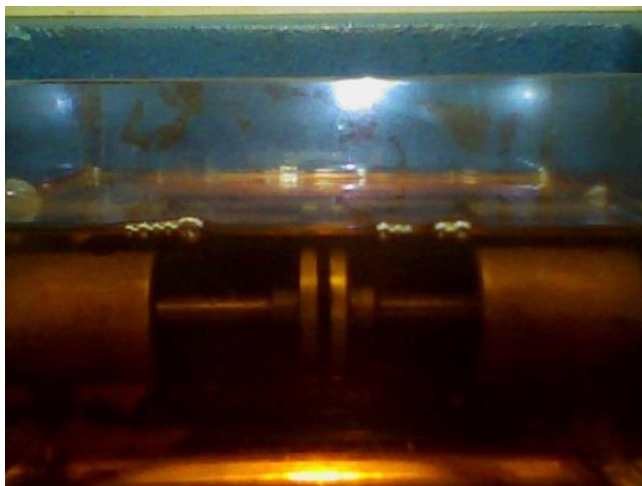


(b) MCR 501

Figura 4. Reômetros utilizados

### 3.3 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica de um fluido representa a capacidade de isolamento elétrico do fluido, sendo que o valor da rigidez dielétrica de um fluido representa a máxima tensão elétrica que o fluido é submetido mantendo sua propriedade de isolamento elétrico. A medição da rigidez dielétrica foi feita no medidor de rigidez dielétrica ElectricTestSerta com ajuste manual da tensão de saída. A cuba onde é depositado o fluido para teste contém eletrodos de bronze com diâmetro de 25,4 mm, espaçados de 2,5 mm. Na Fig. 5 tem-se uma imagem da cuba onde é depositado o fluido para teste, onde é possível ver os eletrodos que submetem o fluido a alta tensão, e uma visão geral do equipamento para medir a rigidez dielétrica. Foram realizadas cinco medições da rigidez dielétrica para cada amostra, com taxa de aplicação da tensão aproximadamente constante. Adotou-se um intervalo de tempo de um minuto entre cada medição da rigidez dielétrica, para que a porção de fluido, entre os eletrodos, que foi ionizada fosse substituída por uma porção de fluido que não foi ionizada. O valor da rigidez dielétrica de cada amostra foi obtido como sendo a média dos valores medidos.



(a)



(b)

Figura 5. (a) cuba do medidor de rigidez dielétrica, preenchida com OTE; (b) Visão geral do medidor de rigidez dielétrica

#### 4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das medições das propriedades dos nanofluidos com nanopartículas de diamante em óleo, conforme metodologia mencionada anteriormente.

##### 4.1 Condutividade térmica

As condutividades térmicas dos nanofluidos e do OTE foram obtidas pelo método transiente do fio quente, que tem sido considerado um método eficiente para medir condutividade térmica de nanofluidos por reduzir efeitos de convecção natural e por apresentar resposta mais rápida que métodos de medição estacionários (Murshed, Leong e Yang, 2008). Os resultados das medições da condutividade térmica dos nanofluidos de MO-MWCNT e MO-diamante são apresentados na Tab. 3, sendo que, estes valores são valores médios com os respectivos desvios, obtidos de cinco medições de condutividade térmica de cada amostra. Pode-se observar que com o aumento na concentração volumétrica das nanopartículas obteve-se um aumento na condutividade térmica dos nanofluidos, fato que é condizente com a teoria do meio efetivo. Porém, os incrementos obtidos com a dispersão de nanopartículas foram bem maiores que os estimados pela teoria do meio efetivo, expressa pela equação de Maxwell (1873):

$$\kappa_{est} = \kappa_{fb} \frac{2\kappa_{fb} + \kappa_{np} + 2\phi(\kappa_{np} - \kappa_{fb})}{2\kappa_{fb} + \kappa_{np} - \phi(\kappa_{np} - \kappa_{fb})} \quad (2)$$

Com o objetivo de comparar os resultados experimentais obtidos no presente trabalho com os resultados de outros autores, incluindo, ainda, o valor estimado na condutividade térmica pela equação de Maxwell (1873), a Fig. 6 apresenta os valores relativos da condutividade térmica de nanofluidos com diferentes nanopartículas em diversos óleos. Nesta figura, pode-se observar que os resultados que mais se aproximaram dos obtidos no presente trabalho (pontos em vermelho) foram aqueles obtidos por Xuan e Li (2000) e Ettefaghi et al. (2013), respectivamente, com os nanofluidos de óleo-Cu e óleo-MWCNT. O elevado aumento na condutividade térmica do OTE, com dispersão das nanopartículas de diamante, pode ser atribuído à grande diferença entre as condutividades térmicas das nanopartículas e do OTE, que conforme apresentado na Tab. 1, é de quatro ordens de grandeza.

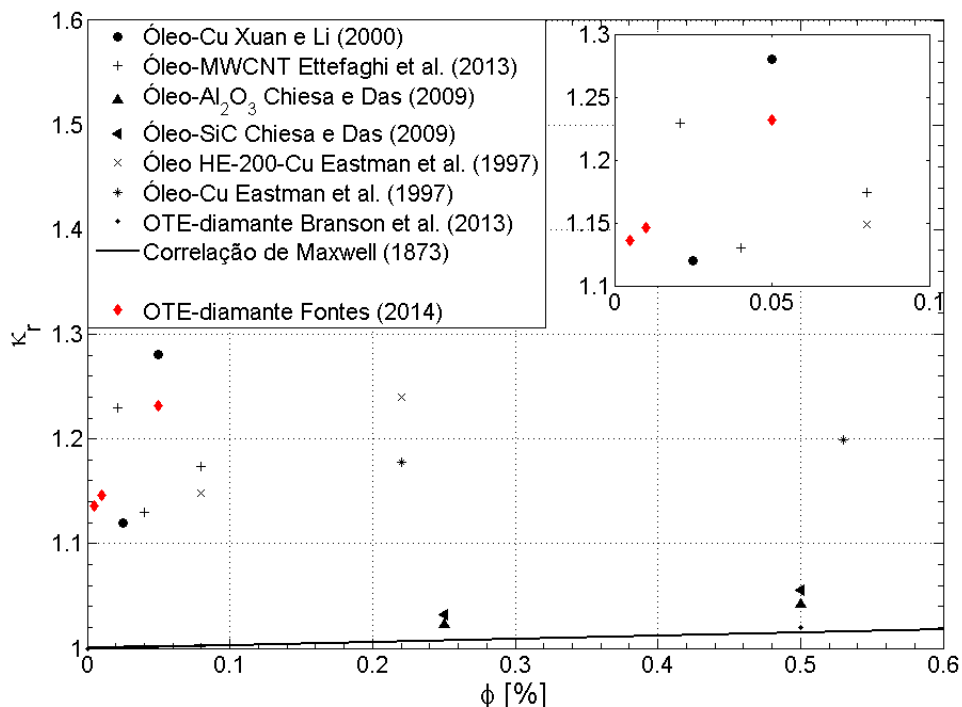


Figura 6. Comparação com outros autores que mediram condutividade térmica de nanofluidos em óleos

### 4.2 Viscosidade dinâmica

Na Fig. 7 é apresentada a curva da tensão pela taxa de cisalhamento na qual as amostras foram submetidas, juntamente com os valores de viscosidade dinâmica ao longo da taxa de cisalhamento. Fica evidenciado que todas as amostras (nanofluidos e fluido de base) apresentaram comportamento newtoniano. A intensificação da viscosidade em função da concentração volumétrica das nanopartículas pode ser visto na Tab. 4, onde os valores apresentados são resultados médios de minimamente dois testes por amostra. Os nanofluidos que apresentaram menor incremento na viscosidade dinâmica, comparado à viscosidade do OTE, foram os nanofluidos ODI1 e ODI2.

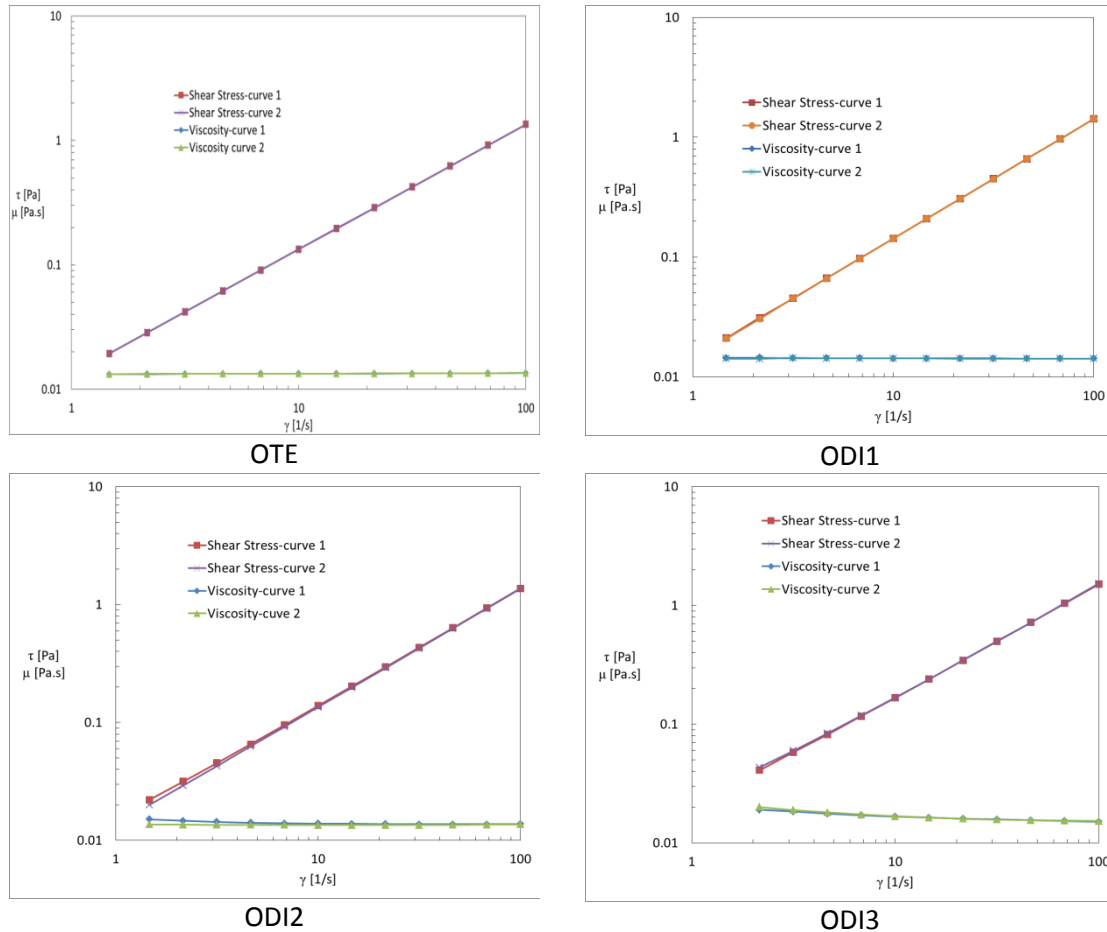


Figura 7. Curvas do comportamento reológico das amostras

Tabela 4. Viscosidade dos nanofluidos e OTE

Amostras	Viscosidade relativa			
	MO	ODI1	ODI2	ODI3
$\mu$ [Pa.s]	0.01335	0.01431	0.01378	0.01378
$\mu_r$	1	1.07	1.03	1.25

### 4.3 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica, que tem um papel primordial no óleo de transformador elétrico, foi medida utilizando o procedimento experimental descrito anteriormente. Os resultados das medições de rigidez dielétrica de todas as amostras são mostrados na Fig. 8, onde é possível observar que com o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas de diamante em MO, a rigidez dielétrica apresentou uma redução não linear, mostrando que estas nanopartículas apresentaram um efeito negativo na rigidez dielétrica do MO.

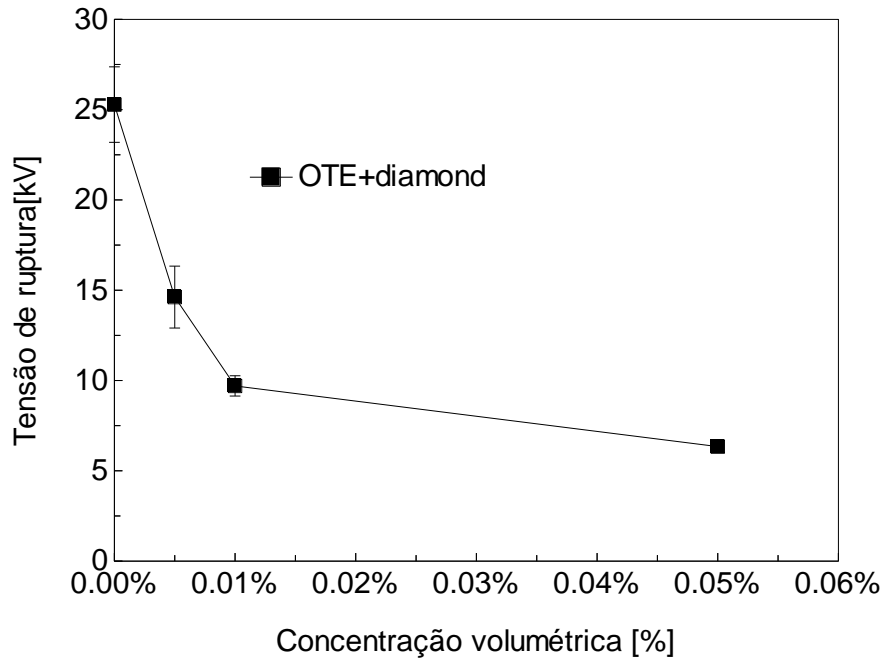


Figura 8. Rigidez dielétrica em função da concentração volumétrica das nanopartículas

A melhora na rigidez dielétrica de óleo de transformador elétrico tem sido obtida na dispersão de nanopartículas específicas, especialmente as de características ferromagnéticas (Segal et al., 1998; Li et al., 2012). Chiesa e Das (2009) utilizando nanopartículas de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$  em óleo mineral obtiveram redução na rigidez dielétrica do óleo mineral, porém utilizando dispersões de nanopartículas de  $Fe_2O_3$  em óleo mineral eles obtiveram aumento da rigidez dielétrica comparada à do óleo mineral puro. Du et al. (2012) obtiveram um aumento de 20% na rigidez dielétrica utilizando dispersão de nanopartículas de  $TiO_2$ , com concentração volumétrica de 0,075%, em óleo mineral.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas medidas experimentalmente a condutividade térmica, viscosidade e a rigidez dielétrica de nanofluidos à base de óleo mineral de transformador elétrico com nanopartículas de diamante com baixas concentrações volumétricas, utilizando método de dois passos na preparação das amostras através de um homogeneizador a alta pressão.

Os resultados das medições da condutividade térmica dos nanofluidos mostraram que, a condutividade térmica dos nanofluidos aumentou com a concentração volumétrica, com incremento de até 23%, para a amostra ODI3, bem acima do previsto pela teoria do meio efetivo, utilizando a equação de Maxwell (1873).

As medições do comportamento reológico das amostras de nanofluidos mostraram que todos os nanofluidos apresentaram comportamento newtoniano. Os incrementos na viscosidade dinâmica do óleo mineral na dispersão das nanopartículas foram relativamente baixos para as amostras ODI1 e ODI2, 7% e 3%, respectivamente e bastante elevado para a amostra ODI3, 25%.

Já as medições da rigidez dielétrica dos nanofluidos revelaram que a utilização destas nanopartículas em óleo mineral levou a uma deterioração da rigidez dielétrica do óleo mineral, sendo que para a menor concentração volumétrica das nanopartículas a rigidez dielétrica foi reduzida em torno da metade da rigidez dielétrica do óleo puro.

Finalmente, em termos das características de isolamento, os nanofluidos não se mostraram adequados, enquanto que em termos de transferência de calor, pode-se considerar que as amostras mais promissoras foram as amostras ODI1, ODI2, em que o aumento relativo da condutividade térmica superou o aumento na viscosidade ( $\kappa_r/\mu_r$ ) em cerca de 6% e 11%, respectivamente.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e Fapemig pelo apoio a esta pesquisa; à equipe do laboratório de reologia da PUC-Rio, pela realização das medições de viscosidade e ao laboratório de transformadores elétricos da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU.

## 6. REFERÊNCIAS



- Choi, S. U. S., Eastman, J. A., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Argonne Natl. Lab.
- Du, Y., Lv, Y., Li, C., Chen, M., Zhong, Y., Zhou, J., et al., 2012, Effect of Semiconductive Nanoparticles on Insulating Performances of Transformer Oil, 770–776.
- Lee, J. -C., Kim, W. -Y., 2012, Experimental Study on the Dielectric Breakdown Voltage of the Insulating Oil Mixed with Magnetic Nanoparticles, Phys. Procedia. 32, 327–334.
- Segal, V., Hjortsberg, A., Rabinovich, A., Natrass, D., Raj, K., 1998, AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles, Conf. Rec. 1998 Int. Symp. Electr. Insul. 619–622.
- Hwang, J., Zahn, M., 2009, Electron scavenging by conductive nanoparticles in oil insulated power transformers, Electrostatics Joint Conference, Boston, MA, USA. 1–12.
- O’Sullivan, F., Hwang, J., 2008, A model for the initiation and propagation of positive streamers in transformer oil, IEEE 2008. 210–214.
- Maxwell, J., 1873, A treatise on electricity and magnetism, Univ. Oxford.
- Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Thomson, L. J., Lee, S., 1997, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, 457, 3–11.
- Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A., 1999, Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, Journal of Heat Transfer. 121, 280–289.
- Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S., 1999, Thermal Conductivity of Nanoparticle - Fluid Mixture, J. Thermophys. Heat Transf. 13, 474–480.
- Assael, M. J., Chen, C. -F., Metaxa, I., Wakeham, W. A., 2004, Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water, Int. J. Thermophys. 25, 971–985.
- Murshed, S., Leong, K., Yang, C., 2008, Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, Int. J. Therm. Sci. 47 (2008) 560–568.
- Branson, B., Beauchamp, P., Beam, J., Lukehart, C., Davidson, J., 2013, Nanodiamond nanofluids for enhanced thermal conductivity, ASCNANO. 3183–3189.
- Ettefaghi, E., Ahmadi, H., Rashidi, A., Nouralishahi, A., Mohtasebi, S. S., 2013, Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant, Int. Commun. Heat Mass Transf. 46, 142–147.
- Chiesa, M., Das, S. K., 2009, Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media, Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 335, 88–97.
- A. Koblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., Eastman, J., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), Int. J. Heat Mass Transf. 45, 855–863.
- Bandarra Filho, E. P., Mendoza, O. S. H., Beicker, C. L. L., Menezes, A., Wen, D., 2014, Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system, Energy Convers. Manag. 84, 261–267.
- Nagasaka, Y., Nagashima, A., 1981, Absolute measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method, J. Phys. E Sci. 14, 1435–1440.
- Motta, F. C., 2012, Characterization of thermal conductivity, dynamic viscosity and contact angle of nanofluids based on gamma-alumina nanoparticles in water, Master thesis, School of Engineering of Sao Carlos. University of Sao Paulo, Brazil (in Portuguese).
- Xuan, Y., 2000, Heat transfer enhancement of nanofluids, Int. J. Heat Fluid Flow. 21 (2000) 58–64.
- Li, J., Zhang, Z. -T., Zou, P., Du, B., Liao, R. -J., 2012, Lightning impulse breakdown characteristics and electrodynamic process of insulating vegetable oil-based nanofluid, Mod. Phys. Lett. B. 26.

## PROPERTIES MEASUREMENTS OF DIAMOND NANOFLUID IN ELECTRIC TRANSFORMER OIL

**Abstract.** *This paper presents the experimental results of thermal conductivity, viscosity and breakdown voltage of nanofluids composed by diamond nanoparticles in mineral oil used in electrical transformer. For thermal conductivity measurements the hot wire method was used, for dynamic viscosity it were used the shear stress curves obtained by a rheometer using a concentric cylinder and finally for the breakdown voltage was taken by the rupture tension of samples in a breakdown voltage equipment. The experimental results obtained to the thermal conductivity and viscosity showed the nanofluids with volumetric concentration of 0.005% and 0.01% presented better results and experimental results of diamond nanofluids showed that the breakdown voltage presented lower values than the pure mineral oil.*

**Keywords:** *Nanofluids, diamond, thermal conductivity, viscosity, breakdown voltage.*