



XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CB/GTM/13

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XIII

GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM

CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE NANOFLUIDOS PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Márcio Antônio Sens
CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

RESUMO

Os nanofluidos magnéticos estão sendo indicado para substituir os tradicionais dielétricos líquidos, principalmente o óleo mineral isolante, em transformadores elétricos de potência. Como vantagem principal, frequentemente, aponta-se a superioridade na condutividade térmica e na capacidade de transferência do calor destes fluidos em relação aos tradicionais. Aponta-se, sobretudo que, pelo fato de serem “magnéticos”, e estarem imersos em campos magnéticos dinâmicos, naturalmente encontrados nos transformadores elétricos, uma agitação seria naturalmente promovida e uma melhor distribuição do calor seria proporcionada pelo novo candidato a fluido dielétrico. O Informe Técnico esclarece, se tal fato é verdadeiro, ou se constitui um mito.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, Dielétrico, Dissipação, Nanofluido, Magnético.

1.0 - INTRODUÇÃO

Denomina-se nanofluido à suspensão sólido-líquido estável em que a fase contínua é líquida e a fase dispersa é constituída por nanopartículas com dimensões características menores do que 100 nm^[1]. Ferrofluidos são nanofluidos cujas nanopartículas são ferromagnéticas ou ferrimagnéticas. Sua principal diferença em relação aos nanofluidos não magnéticos é que os ferrofluidos podem ser magnetizados por campo magnético externo e, geralmente, perdem a magnetização após a remoção do campo magnético externo, razão pela qual podem ser classificados como materiais superparamagnéticos. O surgimento destes materiais se constitui em uma tecnologia aparentemente promissora para o líquido dielétrico de transformadores elétricos, pois consiste na adição de ferrofluidos ao óleo mineral isolante (OMI) de transformadores, tradicional, objetivando melhoras de propriedades dielétricas e/ou térmicas.

Um sistema de análise térmica foi idealizado em 2014 e construído especialmente para a determinação da condutividade térmica efetiva em nanofluidos magnéticos destinados ao uso em transformadores elétricos de potência, na concentração de 0,3 % de nanopartículas magnéticas em suspensão no óleo mineral isolante. A técnica consiste em se utilizar grandes amostras, em torno de um litro, para a simulação de condições reais de uso. Utilizou-se de um sistema padronizado de agulha térmica centralizada na amostra. Aplicaram-se pulsos de calor, através de pulsos de corrente elétrica controlada, percebendo-se as variações térmicas da agulha por meio de termopar instalado em seu interior. Um sistema de medição nanovoltimétrico foi utilizado para perceber variações mínimas de temperatura na agulha térmica centrada na amostra de nanofluido magnético, utilizando-se um osciloscópio digital para armazenar centenas de leituras em alguns segundos de análise. Desta forma, as amostras nunca foram submetidas à excessiva temperatura, que poderiam provocar degradações. Com isto, a mesma amostra pôde ser ensaiada por várias vezes, comprovando-se a consistência dos resultados em ensaios repetitivos.

A técnica foi utilizada com êxito com recipientes de vidro transparentes, contendo água destilada, areia, óleo

mineral isolante, nanofluido magnético e nanofluido magnético sob campo magnético alternado. Como se trata de materiais para uso em transformadores elétricos, onde se encontram campos magnéticos, o recipiente de vidro foi alojado no interior de uma bobina magnética onde o campo poderia ser controlado pela corrente elétrica aplicada. Os resultados são apresentados neste Informe Técnico, mostrando os efeitos da adição de nanopartículas magnéticas ao óleo mineral isolante e do campo magnético aplicado, na efetiva dissipação de calor promovida pelos distintos líquidos analisados. A técnica distingue-se de outras em que se utilizam apenas alguns mililitros de amostras, sem possibilidades de aplicação de campos magnéticos alternados e calor simultaneamente.

Com este Informe Técnico esclarecem-se algumas dúvidas sobre o comportamento térmico dos ferrofluidos, ou nanofluidos magnéticos, na dissipação térmica dos transformadores, considerando que estes são novos materiais que surgiram como candidatos à substituição do tradicional óleo mineral isolante - OMI. Certamente que o presente Informe Técnico adicionará uma melhor compreensão sobre as aplicações dos nanofluidos magnéticos de magnetita em transformadores elétricos de potência, pois mostrará as verdades e os mitos sobre o tema que se dissemina exponencialmente.

2.0 - LEVANTAMENTO DA LITERATURA

Sobre a condutividade térmica de nanofluidos magnéticos em óleo mineral isolante, como candidato ao uso em transformadores elétricos, propriamente, não foram encontradas referências na literatura. Encontram-se raramente, citações sobre vantagens e relatos de experimentos em que o fluido foi comparado no desempenho térmico de equipamentos elétricos, sobretudo em transformadores, em protótipos.

Encontra-se, por outro lado, farta literatura sobre a condutividade térmica da água [12], conforme graficamente mostrado na Figura 1.

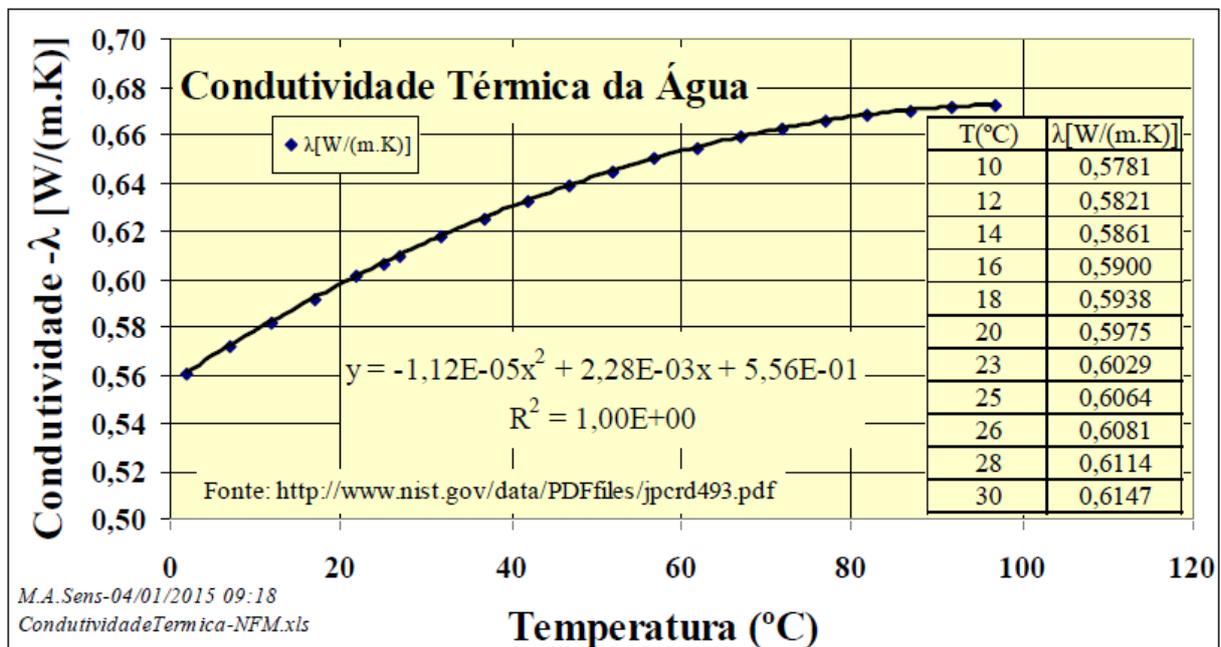


Figura 1 – Condutividade Térmica da Água [12]

Da mesma forma, encontram-se literaturas sobre os efeitos das nanopartículas na condutividade térmica da própria água, ou seja, em adição com esta [10], [3], conforme mostrado na Figura 2. Nesta figura destaca-se que os nanofluidos com menores partículas apresentam melhor condutividade térmica relativa à água. Maiores concentrações e maiores temperaturas também tendem à elevação da condutividade térmica, para o caso da alumina em água - Al_2O_3 - óxido de alumínio, que não é magnética.

3.0 - PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DOS NANOFUIDOS MAGNÉTICOS

Primeiramente, cabe esclarecer as reais propriedades magnéticas destes fluidos à base de óleo mineral isolante, aqui denominado, por força de definições, de “magnéticos”.

Uma série de amostras de nanofluidos magnéticos, à base de magnetita em óleo mineral isolante, foi ensaiada, em distintas concentrações de nanopartículas ferromagnéticas, quanto à susceptibilidade magnética. Os resultados, já publicados [19], [11], [18], indicaram que, de fato, os fluido têm propriedades fracamente paramagnéticas, comparáveis a algumas ligas de alumínio [16], conforme mostrado na Figura 3. Pela linearidade e correlação dos resultados, utilizou-se a técnica, posteriormente, para a identificação da concentração de nanopartículas magnéticas – NPM nas diluições com o óleo mineral isolante [18], com apenas 5 ml da amostra. A Figura 3 ilustra esta possibilidade, inclusive com a incerteza nos resultados, exclusiva para a magnetita diluída no OMI.

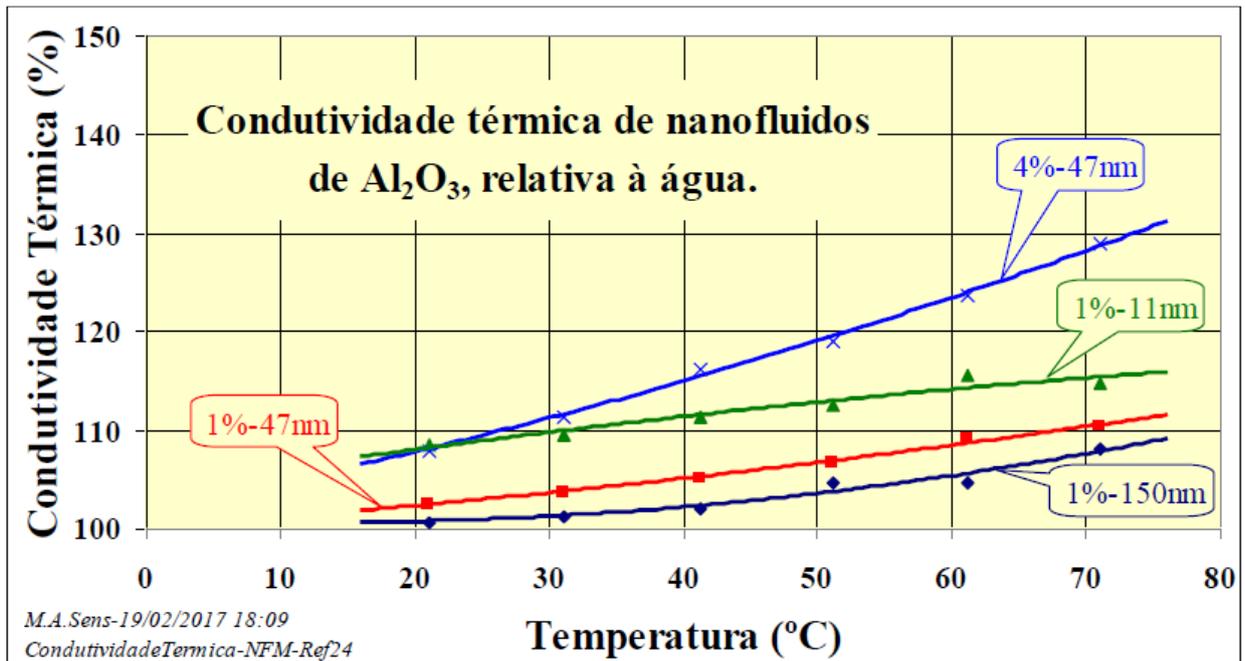


Figura 2 – Condutividade Térmica de Nanofluidos em Água [3]

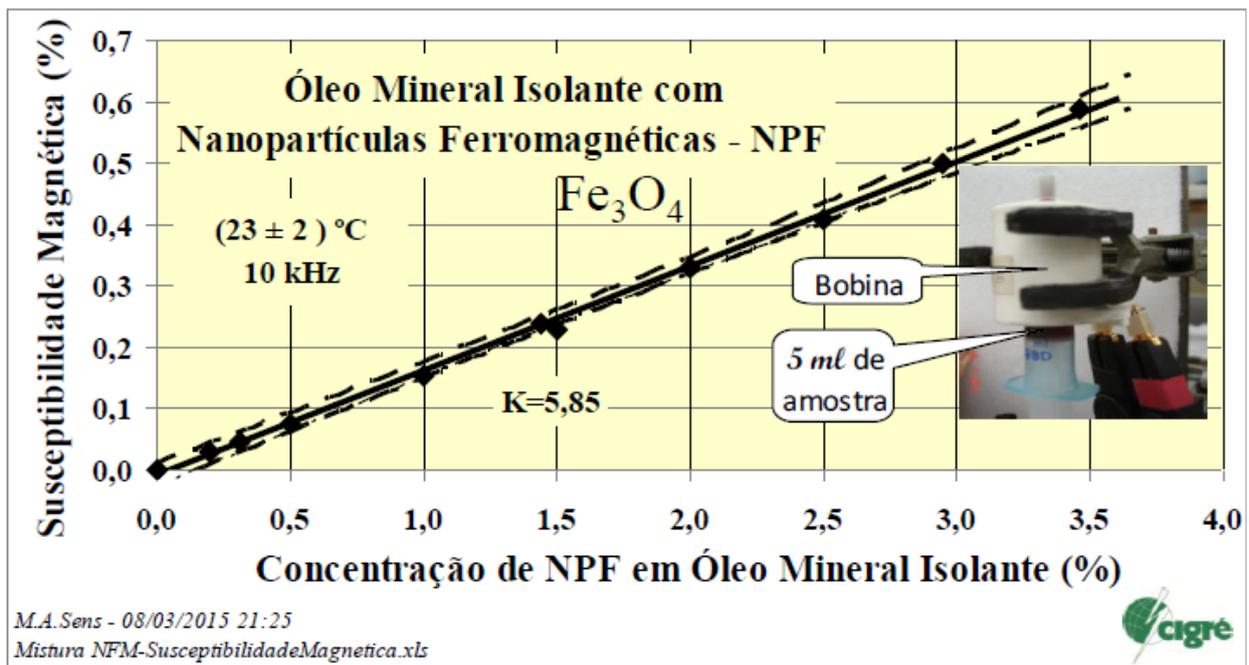


Figura 3 – Características Magnéticas de Nanofluidos Magnéticos [18]

Quanto às propriedades dielétricas, observou-se que não se pode elevar em muito a concentração de nanopartículas magnéticas - NPM no óleo mineral isolante, sob pena de danificá-lo como dielétrico. Concentrações de apenas 0,3 %_{m/m} de NPM à base de magnetita indicaram elevação do fator de dissipação para 60 % [18], como indicado na Figura 4. Valores estes excessivos para aplicações em altos campos elétricos.

Amostras bem mais concentradas, com 3 % de nanopartículas de magnetita no óleo mineral isolante, foram avaliadas quanto à rigidez dielétrica e indicaram total incompatibilidade com os requisitos mínimos para dielétricos líquidos destinados aos transformadores elétricos de potência.

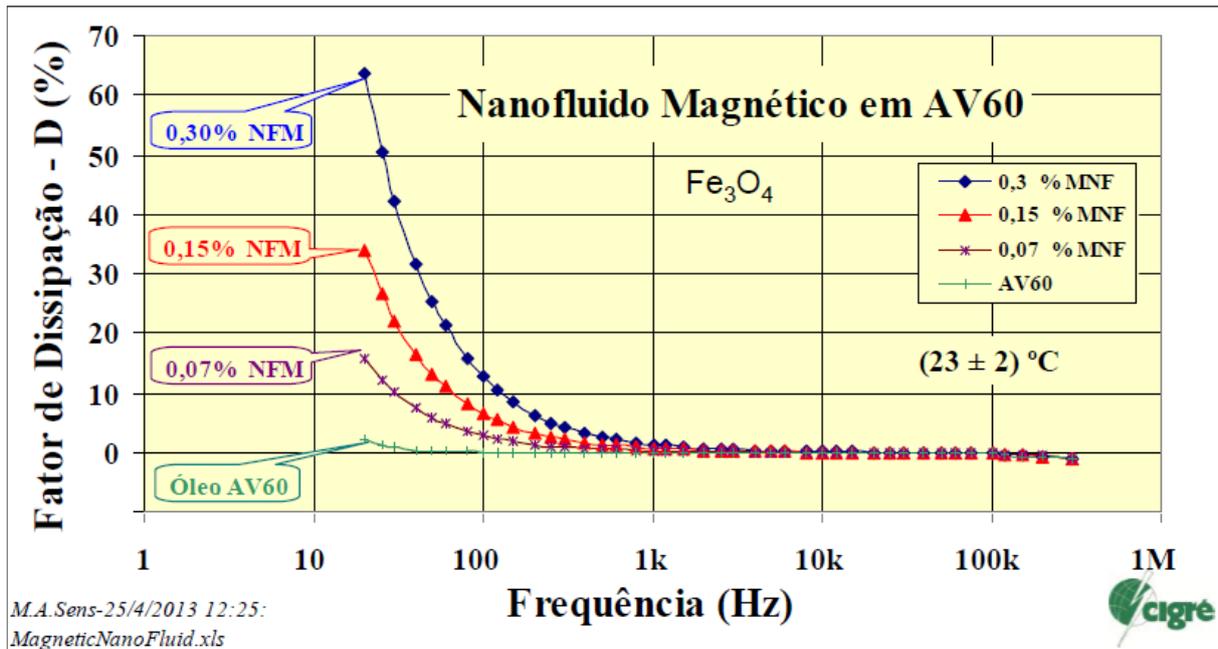


Figura 4 – Fator de Dissipação do Nanofluido Magnético em OMI [18].

4.0 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS CONDUZIDOS PELO CEPEL E RESULTADOS

Os experimentos para a determinação da condutividade térmica de nanofluidos magnéticos, à base de óleo mineral isolante, em suspensões sólido-líquido, na concentração de 0,3 % de nanopartículas de magnetita, funcionalizadas com um tensoativo e com diâmetros inferiores a 10 nm, foram conduzidos nos Laboratórios de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel, na Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, utilizando-se um banho ultratermostático. Os trabalhos foram conduzidos entre os meses de dezembro de 2014 e fevereiro de 2015.

As amostras foram condicionadas no banho térmico para estabilidade da temperatura entre todas as amostras e com a amostra de referência - água, pelo período mínimo de 3 horas, em cada temperatura, de 10; 20; 30 e 40 °C.

Desta forma, uma agulha térmica de aço inoxidável, cilíndrica, de 3 x 200 mm, contendo termopar de medição e elemento de aquecimento, foi introduzida verticalmente na amostra de um litro de nanofluido magnético sob ensaio, na parte central, e outra semelhante na amostra de referência – água destilada. O elemento de aquecimento foi constituído por fio de constantan ($Cu_{55}Ni_{45}$), em bainha de seção circular, com resistência $R = 14,89 \Omega/m$.

Após a estabilização térmica das amostras, foi aplicada uma corrente elétrica de 30 mA pelo elemento de aquecimento. A corrente foi escolhida para resultar em sobrelevação $\Delta T < 2 ^\circ C$ para todas as amostras.

A potência aplicada foi de aproximadamente 500 mW, por aproximadamente 25 segundos, resultando numa energia de aproximadamente 12 J. A monitoração da temperatura foi efetuada por 200 segundos, com taxa de 500 medições por segundo, resultando em 100 mil leituras digitais por ensaio. Cada amostra, em cada temperatura, foi avaliada por cinco vezes, obtendo-se cinco espectros transitórios da sobrelevação da temperatura, como ilustrado na Figura 5 e na Figura 6, esta última com a aplicação de campo magnético externo, de aproximadamente 5 mT.

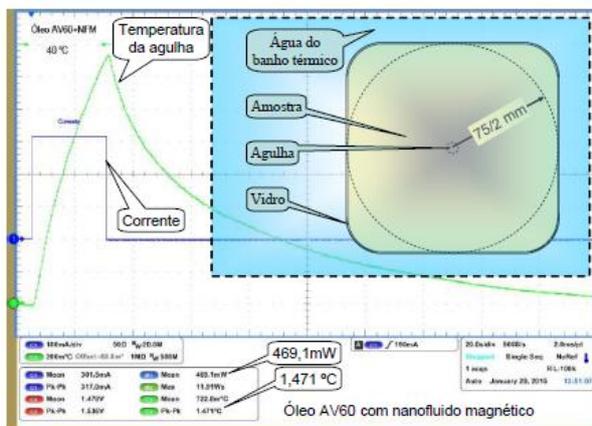


Figura 5 – Aquecimento do OMI com NFM

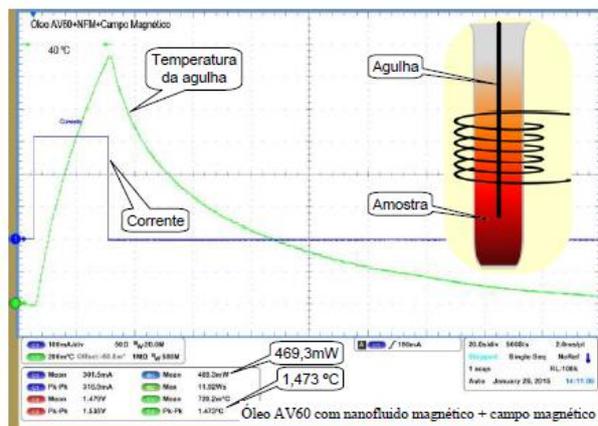


Figura 6 – Aquecimento do OMI + NFM+C.Mg.

Pelo tamanho diametral da amostra, foi selecionada uma agulha térmica com 3 mm de diâmetro, inferior 1/20 do diâmetro do círculo que circunscreve a amostra a ser avaliada. O comprimento mínimo da agulha especificada pelos procedimentos da ASTM D5334/05^[2] seria de 100 mm, sendo utilizada uma agulha de 200 mm. O maior círculo contendo integralmente as amostras foi de 75 mm de diâmetro, conforme ilustrado na **Figura 7** e na **Figura 8**.

Após o período de aquecimento de 25 s a corrente foi interrompida e mantida a monitoração da temperatura pelo período de 200 segundos.

Para a determinação da condutividade térmica foram selecionados os pontos de leituras entre 10 e 24 segundos, sendo adotada a equação prevista no procedimento normativo^[2], conforme abaixo.

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \left\{ \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln(t_2 / t_1)} \right\}}$$

Onde:

λ = Condutividade térmica {W/(m.K)},

Q = Potência do elemento de aquecimento (W/m) = $I^2 \cdot R$; R = 14,89 Ω /m;

T_2 e T_1 = Temperaturas nos pontos entre 10 e 24 s;

$t_1 = 10$ s $t_2 = 24$ s;

I = Corrente pelo elemento de aquecimento, em ampères.

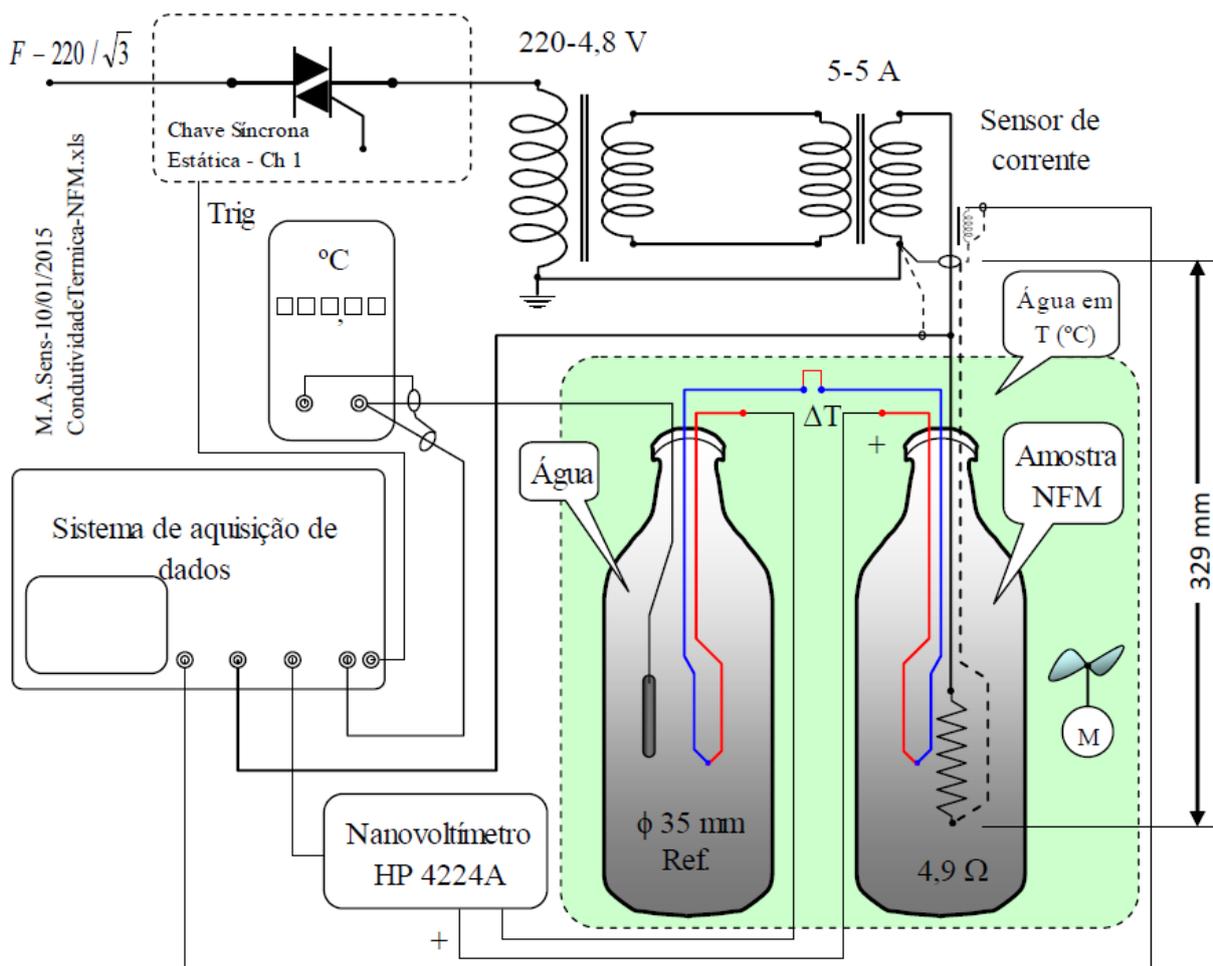


Figura 7 – Circuito de Ensaio para Condutividade Térmica de Nanofluidos Magnéticos

A **Figura 7** mostra o circuito de ensaio, destacando-se que sempre foi utilizada uma amostra de referência térmica, constituída por um litro de água destilada, onde era monitorada a temperatura do ambiente, ou de ensaio. Os termopares das duas agulhas foram ligados em série, em oposição, para a obtenção direta da sobrelevação da temperatura.

A **Figura 8** mostra a agulha utilizada. Pequenas variações iniciais eram compensadas pela zeragem do nanovoltímetro digital. Toda a parte da instalação que ficava para fora e acima do banho térmico foi coberta por câmara de isolamento térmico – isopor, para minimizar efeitos das correntes de ar ambiente e subsequentes oscilações térmicas.

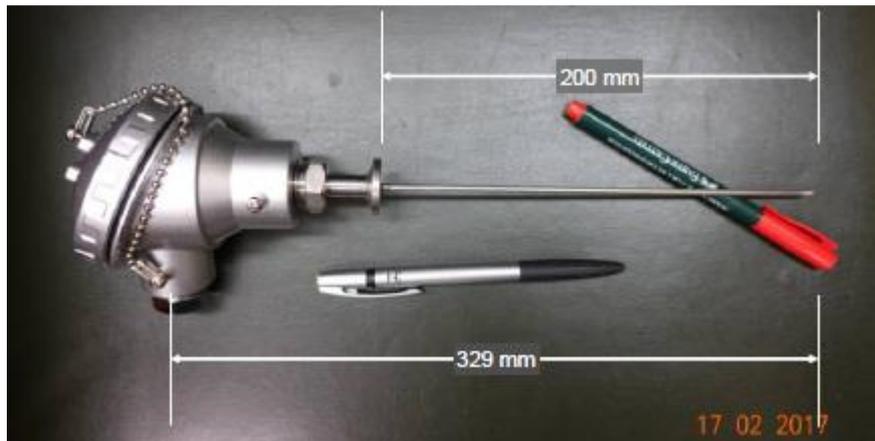


Figura 8 – Agulha Térmica para Injeção do Pulso Térmico e Percepção da Temperatura

A disposição física das amostras e da amostra de referência no banho térmico é mostrada na **Figura 9**. Todos os recipientes de vidro eram semelhantes, incluindo um com areia, de referência, Areia de Guimarães – RN. Dois recipientes continham água destilada e o recipiente com a amostra de nanofluido magnético foi envolto em bobina magnética de cobre para aplicação de corrente elétrica de 60 Hz, para simular as condições reais de aplicações em transformadores elétricos.

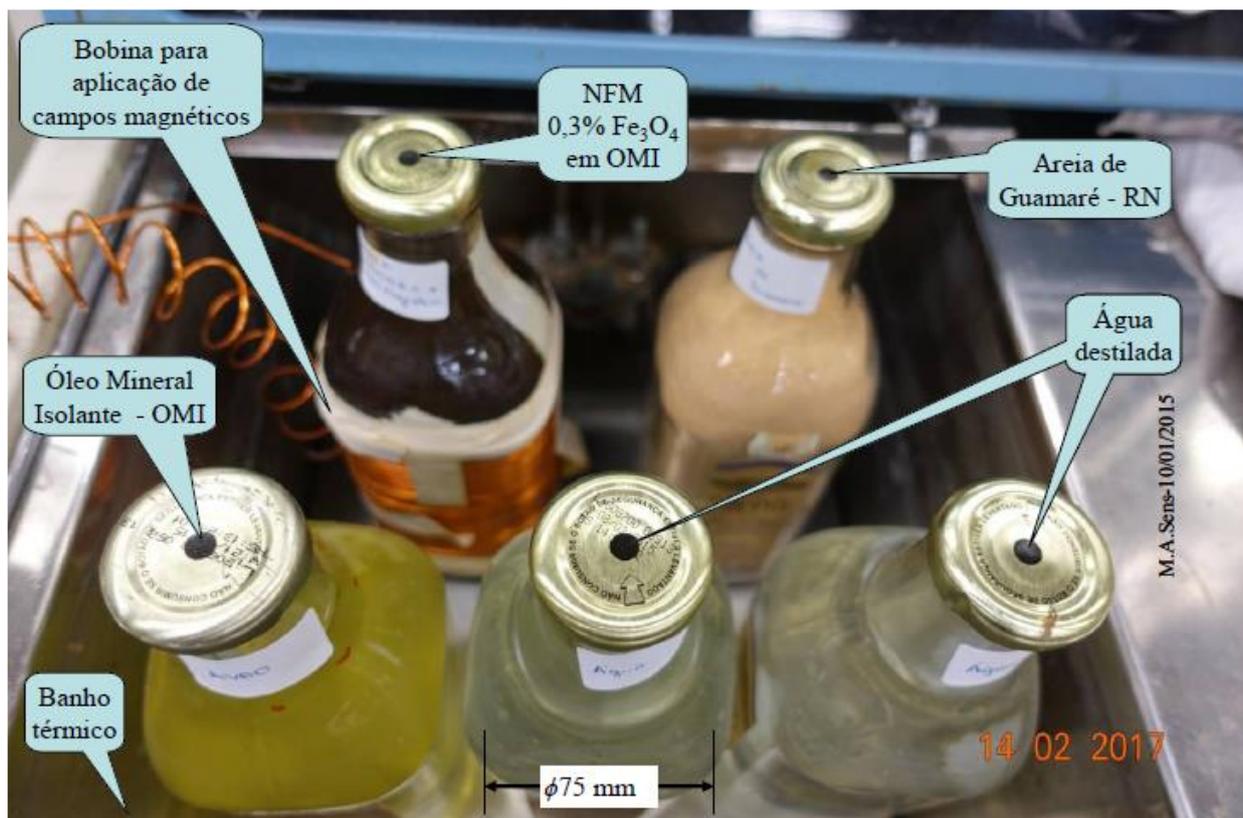


Figura 9 – Disposição Física das Amostras na Banho Ultratermostático

Para validação da técnica experimental, amostras de água destilada e de areia foram ensaiadas, cujas condutividades térmicas já eram conhecidas. Inicialmente intencionava-se a determinação da condutividade térmica utilizando-se os dados da fase de resfriamento, mas estes se mostraram insatisfatórios em confronto com os dados das referências. Identificou-se, posteriormente, que para tempos longos, de 200 segundos, ocorria uma queda natural da tensão indicada pelo nanovoltímetro, denominada comumente de “drift”, que conduzia a resultados

incoerentes, a temperaturas inferiores às iniciais. Desta forma, escolheu-se a fase de aquecimento para as determinações, por serem mais rápidas. A **Figura 10** ilustra uma determinação da condutividade térmica da água na temperatura de 40 °C, destacando-se o ajuste teórico sobre os dados experimentais. O resultado foi bastante coerente com a referência ^[12]. A **Figura 11** mostra o comportamento térmico de todas as amostras ensaiadas.

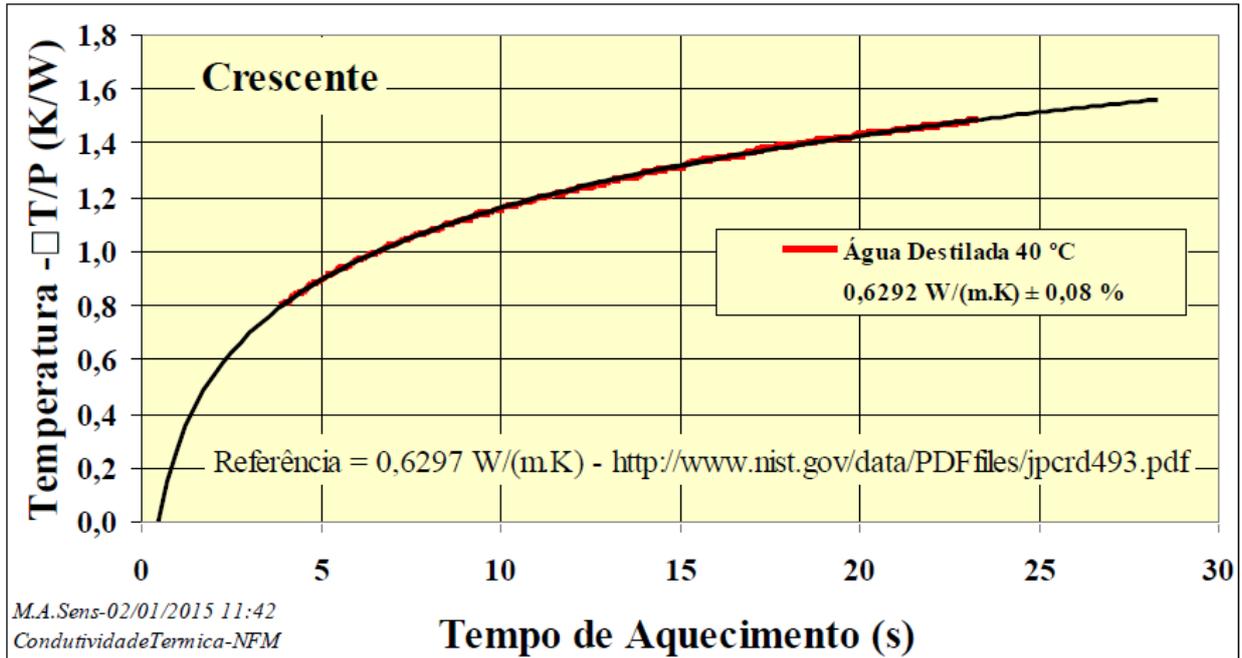


Figura 10 – Determinação da Condutividade Térmica da Água a 10 °C

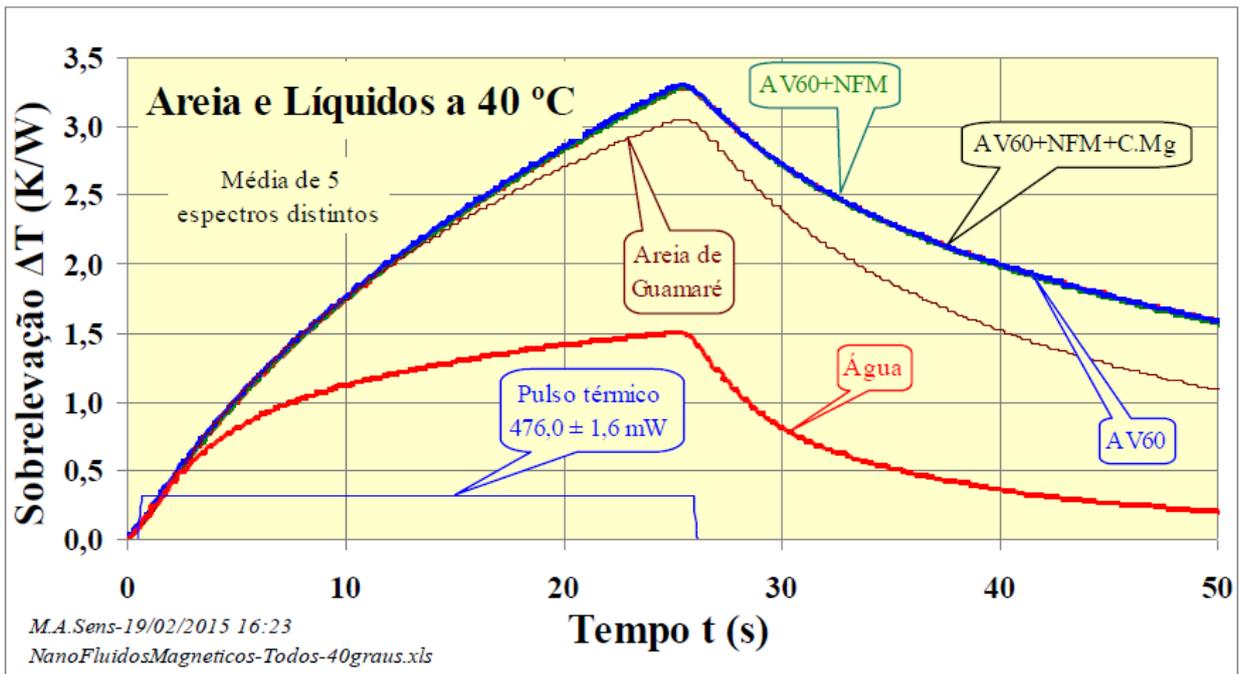


Figura 11 – Resposta Térmica da Agulha Imersa em Líquidos e em Areia

5.0 - CONCLUSÃO

Costuma-se acreditar que a adição de dois materiais distintos, de propriedades elétricas ou térmicas distintas, pode resultar em um novo material cujas propriedades resultem na média das distintas propriedades dos materiais isolados. Isto parece razoável, mas de fato, em pequenas proporções, nem sempre ocorre. Acredita-se, por exemplo, que a adição de pigmentos de zinco em uma tinta, eletricamente isolante, eleve a condutividade elétrica e térmica da mistura. No entanto, inúmeros ensaios realizados pelo Cepel em variadas tintas ricas e pobres em zinco não mostraram qualquer correlação da resistividade elétrica volumétrica com o teor de carga de zinco ^[7]. Isto equivale, de fato, a unir milhares de esferas de aço inoxidáveis, esmaltadas, em um recipiente plástico, e esperar

que o conteúdo seja eletricamente condutivo – constitui mito.

Da mesma forma, acredita-se que a adição de pigmentos de grafite em compósitos poliméricos ou elastoméricos, em proporções suficientes para alterar para negra a cor do composto, eleve significativamente a condutividade elétrica e térmica do material sólido. Experiências envolvendo a adição de cargas de grafite no poli-metil-metacrilato, no poliéster reforçado com fibras de vidro e no náilon demonstraram o insucesso na elevação efetiva da condutividade elétrica e na redução de propriedades eletrostáticas. Portanto, constitui mito acreditar na média de algumas propriedades eletricamente condutivas para misturas entre materiais dielétricos e condutores [17].

Esclareceu-se, assim, a hipótese de que a adição de nanopartículas de magnetita, em pequenas proporções possa, da mesma forma, influenciar positivamente na condutividade térmica de um composto altamente dielétrico e de baixa condutividade térmica. Como mostra a **Figura 12**, a elevação da condutividade térmica do óleo mineral isolante pela adição de nanopartículas magnéticas, em teores de até 0,3 %, capaz de negritar por completo a cor original, sem ou com campo magnético - constitui um mito. Em teores maiores do que esta proporção, a rigidez dielétrica do composto cai drasticamente, inviabilizando a aplicação em transformadores elétricos de potência [1]. Estes foram os resultados obtidos para a amostra preparada e exaustivamente avaliada pelos Laboratórios do Cepel-Fundão. Amostras alheias não foram avaliadas quanto à condutividade térmica.

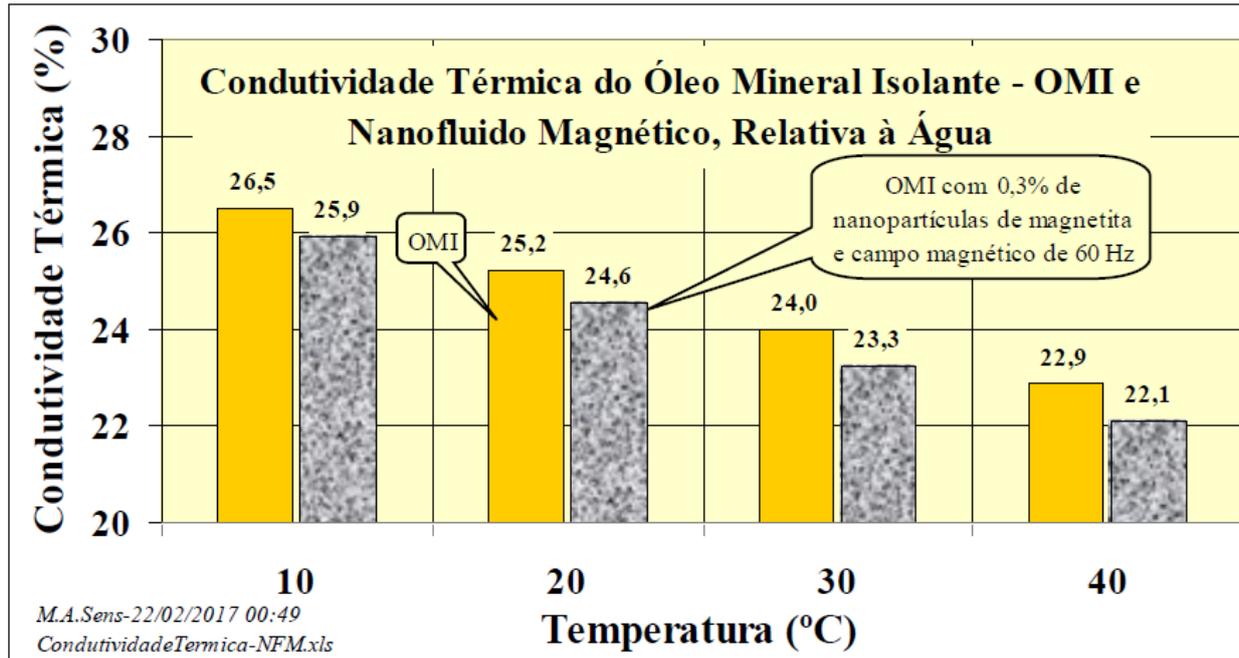


Figura 12 – Condutividade Térmica do Óleo Mineral Isolante

Quanto à natural agitação do candidato avaliado a fluido dielétrico de transformadores, que seria promovida pelo campo magnético naturalmente encontrado no interior dos transformadores de potência, também constitui um mito. Os nanofluidos magnéticos sequer podem ser considerados “magnéticos” pela classificação de materiais, mas fracamente paramagnéticos. Mesmo com 3 % de concentração de nanopartículas magnéticas no óleo mineral isolante, a susceptibilidade magnética ainda resulta inferior a 1 % na temperatura de 20 °C e cai para 0,7 % na temperatura de 90 °C [18]. Isto equivale às propriedades magnéticas de muitas ligas de alumínio destinadas às terminações de cabos de transmissão de energia elétrica em alumínio [16].

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Assis Filho, Francisco; Sens, M. A, Ueti, Edson e outros “Viabilidade de Utilização de Nanofluidos Magnéticos em Transformadores Elétricos”, **XXIII SNPTEE** Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - GRUPO – GTM-Grupo de Estudo Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes, 18 a 21 de Outubro de 2015, Foz do Iguaçu – PR.
- [2] ASTM D5334/05 - Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe.
- [3] Chon, C. H., and Kihm, K. D., Lee, S. P. and Choi, S. U. S., “Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particles Size for Nanofluid Al₂O₃ Thermal Conductivity Enhancement”, Applied Physics Letters, 87(15), 153107, 2005.
- [4] DAS, S. K., CHOI, S. U. S., YU, W. e PRADEEP, T. Nanofluids - Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008.
- [5] DU, Y., LV, Y., LI, C., CHEN, M., ZHOU, J., LI, X., ZHOU, Y. e TU, Y. Effect of electron shallow trap on breakdown performance of transformer oil-based nanofluids, Journal of Applied Physics, Vol. 110, pp. 104104-1-104104-4, 2011.

- [6] EASTMAN, J. A., PHILLPOT, S. R., CHOI, S. U. S. e KEBLINSKI, P. Thermal transport in nanofluids, Annual Review of Materials Research, Vol. 34, pp. 219-246, 2004.
- [7] Fragata, Fernando de Loureiro e M. A. Sens, “Investigações Experimentais com Tintas Industriais para Proteção Metálica Anti-Corrosiva”, Laboratórios de Corrosão e de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel-Eletrabras-Fundão, Rio de Janeiro – RJ. Trabalho não especificamente publicado, constante de relatórios técnicos confidenciais, de Clientes, 1976 a 2015.
- [8] GONZALEZ, E. G. C., MATT, C. F. T., FILHO, F. A., GUEDES, V. G., POLASEK, A., MELLO, D. R., FURTADO, J. G. M., SANTOS, L. A. F., GARCIA, R. W. S. e LIMA, W. F. Estado da arte dos nanofluidos para uso em transformadores elétricos, XV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ (ERIAAC), 19 a 23 de Maio, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.
- [9] HWANG, J. G., ZAHN, M., O’SULLIVAN, F. M., PETTERSSON, L. A. A., HJORTSTAM, O. e LIU, R. Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids, Journal of Applied Physics, Vol. 107, pp. 014310-1-014310-17, 2010.
- [10] Kenneth D. Kihm and Chan Hee Chon, Department of Mechanical, Aerospace, and Biomedical Engineering, The University of Tennessee, Knoxville, TN – USA, Chapter 4, “Thermal Conductivity of Nanofluids and Heat Propagation Velocities”, em Zhang, Yuwen, Editor; “Nanofluids Research, Development and Applications”, Nova-2013.
- [11] KOPČANSKÝ, P., TOMČO, L., MARTON, K., KONERACKÁ, M., TIMKO, M. e POTOČOVÁ, I. The DC dielectric breakdown strength of magnetic fluids based on transformer oil, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 289, pp. 415-418, 2005.
- [12] M. L. V. Ramires; C. A. Nieto de Castro; Y. Nagasaka; A. Nagashima; M. J. Assael; W. A. Wakeham, “Standard Reference Data for the Thermal Conductivity of water - TCHW - Transient coated hot wire technique” – NIST-USA, July 1994. Disponível em: <http://www.nist.gov/data/PDFfiles/jpcrd493.pdf>.
- [13] O’SULLIVAN, F. M. A model for the initiation and propagation of electrical streamer in transformer oil and transformer oil based nanofluids. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2007.
- [14] SEGAL, V. e RAJ, K. An investigation of power transformer cooling with magnetic fluids, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 5, pp. 416-422, 1998.
- [15] SEGAL, V., HJORTSBERG, A., RABINOVICH, A., NATTRASS, D. e RAJ, K. AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.
- [16] Sens, M. A. e Ueti, Edson, “Investigações Experimentais em Análise de Materiais Destinados às Terminações de Cabos de Alumínio para Transmissão de Energia Elétrica”, Laboratórios de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel-Eletrabras-Fundão, Rio de Janeiro – RJ. Trabalho não especificamente publicado, constante de relatórios técnicos confidenciais, de Clientes, 1976 a 2015.
- [17] Sens, M. A. Sens “Características Eletrostáticas de Polímeros Proponentes ao Uso em Ambiente de Atmosfera Classificada, Como Plataformas de Petróleo e em Minas”. Investigações experimentais conduzidas nos Laboratórios de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel-Eletrabras-Fundão, Rio de Janeiro – RJ. Trabalho não especificamente publicado, constante de relatórios técnicos confidenciais, de Clientes, 1976 a 2015.
- [18] Sens, M. A.; Assis Filho, Francisco de, e UETI, Edson Electromagnetic Characterization Of Magnetic Nanofluid”, D1-05 - XVI ERIAC – Encontro Regional Ibero-americano da Cigré, Iguazú, Argentina, 17 a 21 de Mayo de 2015.
- [19] Sens, M. A.; Ueti, E.; Assis Filho, Francisco; A., Matt, C. F. T., Polasek, A., Furtado, J. G. M., Silva, L. A. F., Guedes, V. G., Lima, W. F. e Garcia, R. W. S. “Electromagnetic characterization of magnetic nanofluido”, Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), August 24-29, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2014.
- [20] SINGH, A. K. Thermal conductivity of nanofluids, Defence Science Journal, New Delhi, Vol. 58 (5), 2008.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Márcio Antônio Sens, nascido em 07/07/1951, em Ituporanga – SC, Técnico em Eletromecânica (ETFSC-1970), Engenheiro Eletricista e de Segurança (UFSC-1975) é pesquisador da Eletrabras - Cepel, no Rio de Janeiro – RJ, onde atua desde fevereiro de 1976 em estudos relacionados aos materiais elétricos condutores, dielétricos e magnéticos e também em análise periciais destinadas à identificação de causas de falha em equipamentos e instalações ligadas ao Setor Elétrico Nacional. O Autor também é professor de Materiais Elétricos, Medidas Elétricas, MS-Excel para Engenharia e Transformadores Elétricos no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense, em Niterói – RJ, onde atua desde março de 1984.