



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM/15
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIII

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

VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE NANOFLUIDOS MAGNÉTICOS EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

**F. Assis Filho(*); M. A. Sens; E. Ueti; H. J. A. Martins e C. F. Matt
ELETROBRAS - CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

RESUMO

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. 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 externo, razão pela qual são classificados como materiais superparamagnéticos. Uma tecnologia aparentemente promissora consiste na adição de ferrofluidos ao óleo mineral isolante (OMI) de transformadores, objetivando melhoras de propriedades dielétricas e térmicas.

PALAVRAS-CHAVE

Nanotecnologia, ferrofluido, nanofluido, magnetita, transformador.

1.0 - INTRODUÇÃO

Segundo a literatura internacional, a aplicação dos nanofluidos magnéticos (NFM) em transformadores elétricos poderá resultar em construções mais leves e compactas e elevação do carregamento. Tais expectativas decorrem da diminuição da temperatura; pela melhoria na taxa de transferência de calor; e melhora de desempenho dielétrico. Espera-se, portanto, um aumento do tempo de vida útil do transformador, um aumento na densidade de corrente durante operação. Entretanto, há poucos estudos disponíveis na literatura sobre a viabilidade técnica de aplicação de ferrofluidos em transformadores, mas resultados preliminares parecem indicar que a adição de nanopartículas ferromagnéticas, como a magnetita, ao óleo mineral isolante (OMI) de transformadores pode levar à melhoria do funcionamento destes equipamentos^{(1), (3)}. SEGAL e RAJ⁽¹⁾ e SEGAL *et al.*⁽²⁾ verificaram que a adição de pequenas frações volumétricas de nanopartículas de magnetita promove um aumento da ordem de 100 % na tensão disruptiva de polaridade positiva do OMI. Outros estudos mais recentes indicam que a adição de nanopartículas semicondutoras de dióxido de titânio, ou titânia, também promove aumentos da ordem de 20 % na rigidez dielétrica do OMI sob corrente alternada e sob impulso⁽⁴⁾.

Os mecanismos físicos responsáveis pelas melhorias verificadas tanto nas propriedades dielétricas quanto nas propriedades de transporte de calor dos nanofluidos ainda não estão completamente compreendidos. Todavia, existem estudos em que se propõem diferentes mecanismos físicos para explicar estes aumentos verificados experimentalmente^{(4), (5), (6)}. É consenso, na comunidade científica, que melhorias significativas nas propriedades de transporte do calor pelo nanofluido dependem fortemente da homogeneidade e da estabilidade da suspensão.

No presente estudo foram utilizadas suspensões sólido-líquido com baixas concentrações de nanopartículas de magnetita funcionalizadas com um tensoativo e com diâmetros inferiores a 10 nm, pois, para diâmetros maiores e partículas não funcionalizadas, a interação magnética entre as partículas se sobrepõe à energia térmica que as mantém dispersas, favorecendo a formação de aglomerados.

(*) Avenida Horácio Macedo, 354 – Ilha do Fundão – 21941-911 – Rio de Janeiro – RJ - Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6000 – Email: franc@cepel.br

Este Informe Técnico apresenta alguns resultados experimentais realizados em amostras de nanofluidos magnéticos, a base de magnetita, quando adicionados ao óleo mineral isolante AV60. São apresentados os resultados obtidos por técnicas de caracterização via microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersada (EDS), microscopia eletrônica de transmissão (MET); caracterizações químicas e físico-químicas; susceptibilidade magnética, fator de dissipação, rigidez dielétrica à corrente alternada de 60 Hz e ao impulso atmosférico. Foram analisadas amostras com concentração de até 3 % m/m de nanopartículas óxidas¹ em OMI. Objetivou-se, com os estudos, a compreensão destes parâmetros, o manuseio do ferrofluido, a avaliação do comportamento do OMI na presença de nanopartículas magnéticas, da estabilidade ao longo do tempo, entre outros, que constituem os fundamentos para as análises de viabilidade da utilização do nanofluido em equipamentos do Setor Elétrico.

O conjunto destas determinações agregou informações que contribuíram para o melhor entendimento do comportamento destes fluidos. Dentro da combinação das técnicas utilizadas, aplicou-se uma técnica experimental de ensaio desenvolvida pelo Cepel que se mostrou uma ferramenta importante para determinação das características eletromagnéticas destes novos materiais.

Ferrofluidos ou fluidos magnéticos, também denominados coloides magnéticos⁽²⁾, são suspensões de nanopartículas ferromagnéticas ou ferrimagnéticas, como a magnetita (Fe₃O₄) e a hematita (Fe₂O₃), dispersas em líquido polar ou apolar. Ferrofluidos se caracterizam por sua magnetização na presença de campo magnético externo. Este tipo de nanofluido é considerado um material superparamagnético, isto é, na ausência de campo magnético externo ele não permanece magnetizado. Por possuírem elevada estabilidade e propriedades únicas, os ferrofluidos podem ser empregados como selantes, fluidos de resfriamento e dielétricos.

A aplicação de maior interesse para ferrofluidos no Setor Elétrico é a sua possível utilização como fluido de resfriamento em transformadores elétricos, para dissipação do calor gerado no enrolamento condutores e no núcleo magnético, e como isolante dielétrico de transformadores. Embora a prática atual recomende a minimização de partículas suspensas no óleo mineral de transformadores em razão do seu efeito deletério sobre a rigidez dielétrica do óleo, deve-se ressaltar que as dimensões características das nanopartículas magnéticas são duas a três ordens de grandeza inferiores às dimensões das partículas tipicamente encontradas em óleo de transformador. Uma revisão do estado-da-arte da aplicação de ferrofluidos em transformadores encontra-se documentada em GONZALEZ *et al.*⁽⁷⁾.

O presente trabalho foi motivado, portanto, pela possibilidade de utilização de ferrofluidos como aditivo ao fluido dielétrico de transformadores. Essa viabilidade incluiria tanto o aspecto econômico quanto a sua eficácia no isolamento elétrico e na dissipação do calor. Caso o ferrofluido estudado apresente desempenho aceitável do ponto de vista dielétrico nos ensaios de alta tensão e comportamento similar ao OMI em outras propriedades físico-químicas, e sua compatibilidade com os outros materiais isolantes, este poderá ser avaliado como possível substituto, em algumas situações, para o óleo mineral isolante tradicional.

A síntese do ferrofluido constitui-se no passo mais importante para um estudo bem sucedido com essas suspensões. Algumas exigências são essenciais tais como: homogeneidade, estabilidade em longo prazo, durabilidade, pouca aglomeração de nanopartículas e não alteração química do fluido-base. O principal problema encontrado durante a síntese de ferrofluidos é justamente a aglomeração das nanopartículas. SINGH⁽⁸⁾ afirma que ainda não existe um método de preparação padrão para nanofluidos. Existem basicamente dois métodos de preparação: métodos de passo único; e método de dois passos (ou *dispersion method*) que é o mais utilizado atualmente. O emprego de dispersantes, também denominados surfactantes², é uma das técnicas adotadas para reduzir a formação de aglomerados nos nanofluidos sintetizados com o método de dois passos⁽⁹⁾.

A primeira etapa no processo de síntese dos ferrofluidos investigados neste trabalho foi definir o tamanho máximo das nanopartículas magnéticas de modo a minimizar a formação de aglomerados. Para garantir a estabilidade do ferrofluido, os efeitos térmicos oriundos da agitação das nanopartículas (movimento Browniano) devem ser maiores do que os efeitos gravitacional e magnético⁽¹⁰⁾. Com base neste princípio, O'SULLIVAN⁽¹⁰⁾ obteve uma expressão para o diâmetro máximo das nanopartículas magnéticas. Esta expressão foi utilizada para o cálculo do diâmetro máximo das nanopartículas de magnetita empregadas na síntese dos ferrofluidos investigados. Além do controle rigoroso no tamanho das nanopartículas, durante a síntese dos ferrofluidos, utilizou-se ácido oléico como surfactante de modo a minimizar a formação de aglomerados. Em uma segunda etapa, as nanopartículas previamente produzidas foram misturadas ao OMI e a sua dispersão no óleo foi feita por meio de ultrassom e agitação mecânica. Segundo EASTMAN *et al.*⁽⁶⁾ e SINGH⁽⁸⁾, estas duas técnicas têm se mostrado adequadas para nanopartículas óxidas.

Na seção 2.0 são apresentados os materiais utilizados e as técnicas de caracterização das amostras de ferrofluido sintetizadas. Na seção 3.0 são apresentados os procedimentos experimentais e os resultados obtidos para as propriedades elétricas e magnéticas dos ferrofluidos sintetizados. Por último, são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

2.0 - MATERIAIS UTILIZADOS E CARACTERIZAÇÃO

2.1 Óleo Mineral Isolante

Óleo mineral isolante (OMI) de base naftênica inibido, AV60IN, fornecido pela Petrobras, atendendo às especificações da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis⁽¹¹⁾.

¹Nanopartículas óxidas – São nanopartículas ferromagnéticas como a magnetita (Fe₃O₄) e hematita (Fe₂O₃).

²Surfactantes são tipicamente moléculas de cadeia longa que ajudam a manter as nanopartículas separadas no colóide, evitando aglomeração.

2.2 Nanopartículas

A magnetita foi selecionada como nanopartícula para os estudos. A síntese da magnetita foi realizada por via úmida e o tamanho das partículas foi controlado durante o processo de fabricação. A magnetita nanoparticulada assim obtida foi funcionalizada com ácido oléico e sua dispersão foi efetuada em hexano, permitindo inserir ou dispersar a mesma em meios apolares, que para o caso em estudo foi utilizado o óleo mineral isolante AV60.

Composição: Magnetita, com presença de hematita, funcionalizadas com ácido oléico e hexano.

Aspecto: Líquido preto. Outras Informações prestadas no certificado do fornecedor, conforme [Tabela 1](#).

TABELA 1 – DADOS TÉCNICOS DA NANOPARTÍCULA UTILIZADA

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA	PROPRIEDADE OBSERVADA	VALOR MEDIDO
Gravimetria	Teor de material	61 %
Adsorção gasosa	Área superficial do pó	122 m ² /g
	Tamanho de partícula	9 nm

A [Figura 1](#) apresenta a imagem de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas obtidas e a caracterização das nanopartículas através da técnica de difração de raios-X.

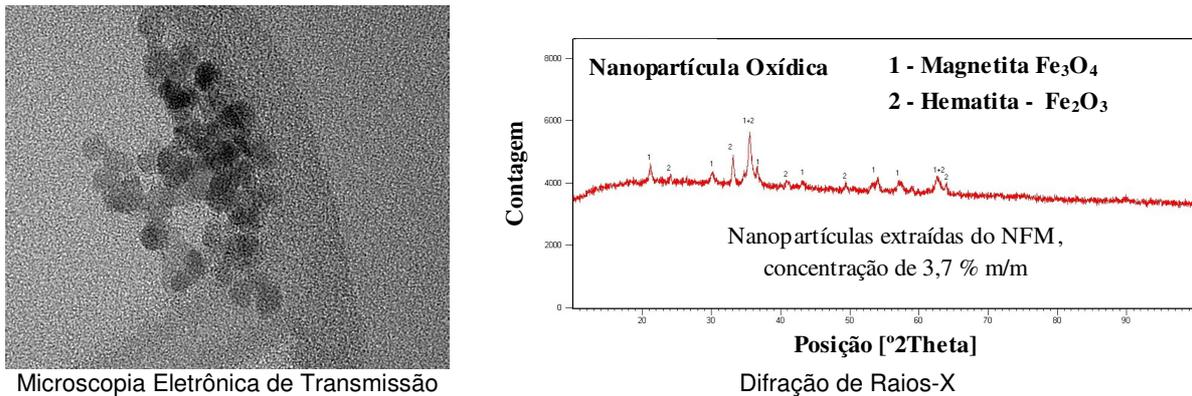


FIGURA 1 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA

2.3 Preparação das suspensões de NFM

As nanopartículas óxidas foram dispersas em OMI através de processos de ultrassom e sonicação, numa concentração máxima de 3,7 % m/m.

3.0 - PROCEDIMENTOS E RESULTADOS

3.1 Caracterização Eletromagnética

As primeiras experiências para caracterização eletromagnética do NFM foram realizadas com uma bobina de válvula solenóide e um tubo de ensaio, com capacidade para 5 m³, preenchido com o NFM, como ilustrado na [Figura 2](#).

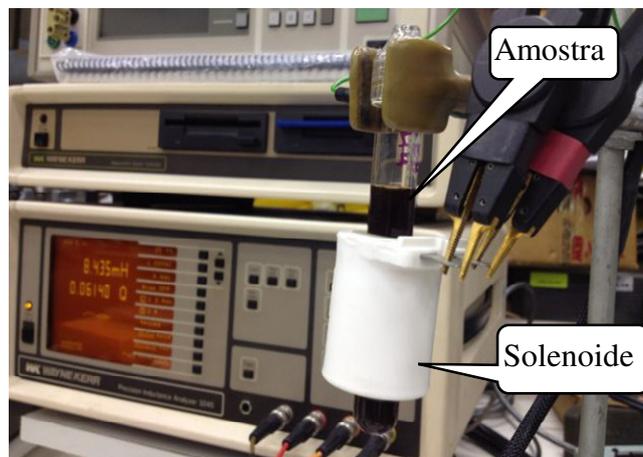


FIGURA 2 – TUBO DE ENSAIO COM NFM E BOBINA SENSORA PARA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELETROMAGNÉTICOS.

Maiores detalhes sobre a metodologia experimental utilizada pelo CEPEL para caracterização das propriedades eletromagnéticas do OMI e dos ferrofluidos encontram-se documentadas em publicação recente⁽¹²⁾. Com a metodologia utilizada pelo CEPEL, foram feitas inicialmente medições comparativas da susceptibilidade magnética do OMI e do ferrofluido para diferentes concentrações de nanopartículas de magnetita. Os resultados mostraram-se de correlação linear entre a concentração de nanopartículas ferromagnéticas – NPF adicionadas ao OMI e a susceptibilidade magnética do ferrofluido, como mostrado na **Figura 3**.

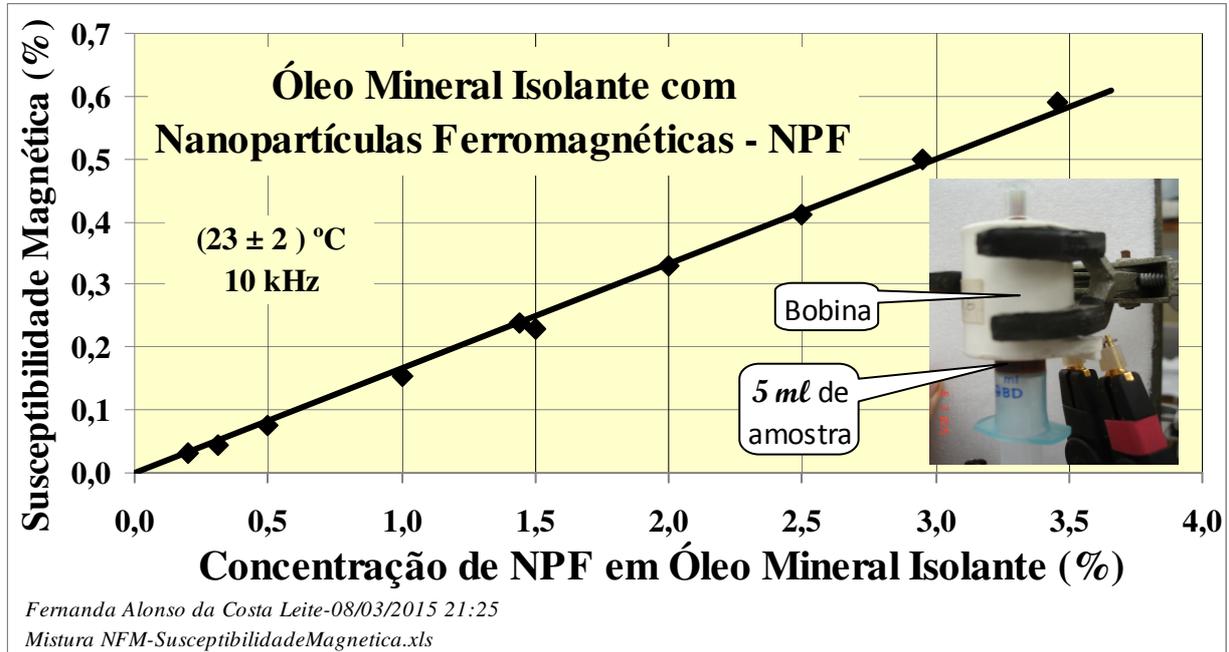
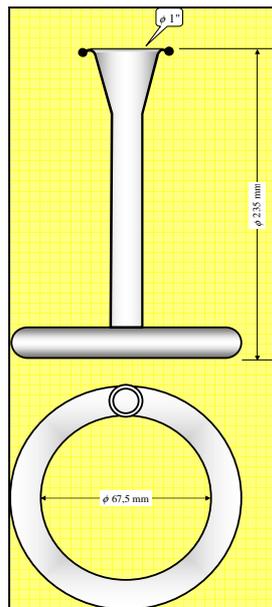
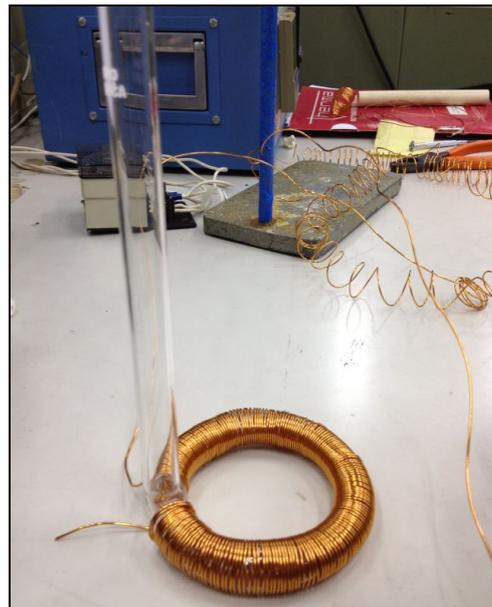


FIGURA 3 – CORRELAÇÃO ENTRE A SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA E A CONCENTRAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS FERROMAGNÉTICAS NO OMI.

Posteriormente, foram introduzidas melhorias para reduzir os efeitos de dispersões de fluxo magnético na medição das propriedades eletromagnéticas das amostras, com a confecção de um porta-amostra no formato toroidal, com diâmetro interno de 67,5 mm e capacidade para 70 m³. Uma bobina sensora de cobre com 180 espiras foi enrolada sobre a forma toroidal para medição dos parâmetros eletromagnéticos do NFM, como mostrado na **Figura 4**.



(a) Dimensões do porta-amostras de vidro



(b) Porta-amostras com 180 espiras de cobre

FIGURA 4 – PORTA AMOSTRAS PARA AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS

Com este dispositivo, a susceptibilidade magnética de suspensões de AV60 com nanopartículas de magnetita foi medida em temperaturas entre 10 e 95 °C, para concentrações de nanopartículas entre 0,07 e 3 % m/m, observando-se um leve decaimento da mesma com a temperatura ⁽¹²⁾. Foram utilizados uma ponte RLC Wayne Kerr 3245, nas frequências de 20 Hz a 100 kHz, e a tensão aplicada de 1 a 5 V. Fotografias do porta-amostra e dos equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização eletromagnética são apresentadas na **Figura 5**.



FIGURA 5 – PORTA-AMOSTRA, ACESSÓRIOS E EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS ELETROMAGNÉTICOS.

Ensaio normatizado para determinação da rigidez dielétrica (IEC 60156) ⁽¹³⁾, constante dielétrica e fator de dissipação de líquidos isolantes elétricos (ASTM D 924) ⁽¹⁴⁾ também foram realizados nas amostras de NFM, com objetivo de verificar a integridade dielétrica das mesmas. Várias amostras com diferentes concentrações até 0,3 % m/m de nanopartículas magnéticas em OMI foram ensaiadas e os resultados mais significativos são apresentados na **Figura 6**, para a temperatura de 23 °C e para a frequência de 1 kHz ⁽¹²⁾.

A rigidez dielétrica resultou em 99,4 kV/2,5mm para o AV60 e 95,4 para a amostra de nanofluido de 0,30 % m/m.

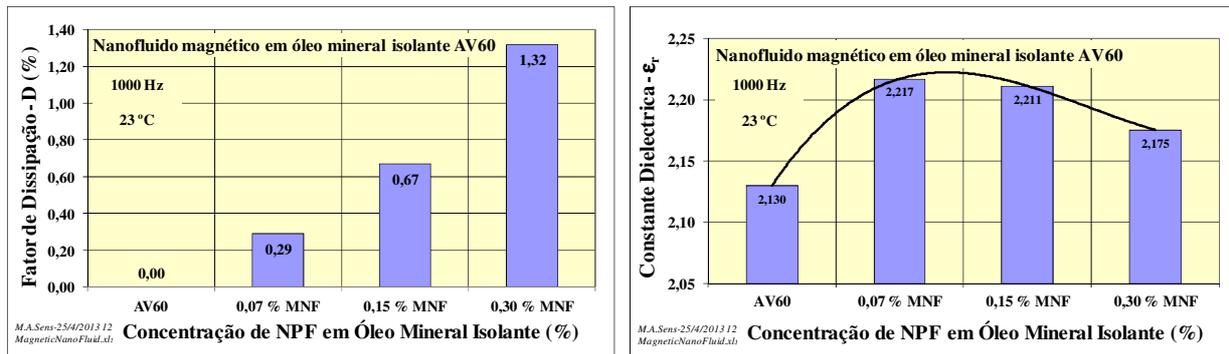


FIGURA 6 – FATOR DE DISSIPÇÃO E CONSTANTE DIELÉTRICA DO OMI AV60COM NPF ⁽¹²⁾.

Os resultados mostraram que à medida que a concentração de nanopartículas ferromagnéticas no OMI aumenta, o fator de dissipação aumenta. Em relação à constante dielétrica, verifica-se um comportamento crescente-decrescente em função da concentração, mas com menor alteração.

3.2 Suportabilidade dielétrica do ferrofluido ao impulso atmosférico

Nos ensaios de suportabilidade dielétrica ao impulso atmosférico, foram ensaiados o OMI de base naftênica AV60 e amostras de ferrofluidos com concentrações de 0,75% m/m, doravante designado por FF1; 0,30% m/m - FF2 e 0,11 % m/m - FF3. Os ensaios foram realizados seguindo as recomendações das normas ASTM D3300-00 ⁽¹⁵⁾ e NBR IEC 60060-1:2013 ⁽¹⁶⁾ quanto à aplicação de ondas padronizadas de impulso atmosférico (1,2/50 μ s).

3.2.1 Procedimento para medição da suportabilidade dielétrica sob impulso atmosférico

Os principais componentes utilizados nos ensaios de suportabilidade dielétrica sob impulso atmosférico foram:

(i) Gerador de impulsos de 700 kV; (ii) sistema de medição e divisor de tensão; e (iii) célula de ensaio conforme ASTM D 3300-00, construída no CEPEL. Na **Figura 7** apresentam-se um desenho esquemático da célula de ensaios e uma foto da célula utilizada nos ensaios realizados no CEPEL.

Seguindo as recomendações da norma ASTM D3300, foram aplicadas ondas plenas de polaridade negativa e positiva de 1,2/50 μ s, com tolerância de 30 % (0,84 μ s até 1,56 μ s) para frente de onda e de 20 % (40 μ s até 60 μ s) para cauda.

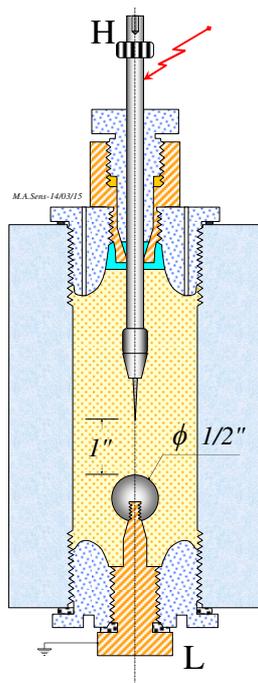


FIGURA 7 – CÉLULA DE ENSAIO UTILIZADA NOS ENSAIOS DE RIGIDEZ DIELÉTRICA SOB IMPULSO ATMOSFÉRICO

O gerador de impulsos de tensão utilizado nos ensaios necessita uma tensão mínima de 300 kV, ajustável para passos de 10 kV. O erro aceito para o equipamento de medição é de 5 % em relação ao pico da onda de tensão. Os eletrodos imersos no fluido dielétrico são compostos por uma esfera de aço ou latão com $\frac{1}{2}$ " de diâmetro e uma agulha de aço utilizada em máquinas de costura Singer, número 14. A célula de ensaio foi construída com material de alta resistência dielétrica e com dimensões apropriadas para garantir que a descarga elétrica ocorra no espaçamento (*gap*) entre os eletrodos, conforme indicado **Figura 7**. O espaçamento (*gap*) entre a agulha e a esfera foi mantido fixo em uma polegada. Durante os ensaios, a cada descarga, a esfera foi trocada de posição e tanto o eletrodo agulha quanto o líquido dielétrico sob ensaio foram substituídos.

3.2.2 Análise dos resultados

Os resultados dos ensaios de impulso atmosférico de polaridade negativa em uma amostra de OMI com nanopartículas ferromagnéticas, quando avaliados utilizando-se critérios estatísticos com base na média de disrupções, no desvio-padrão populacional, no coeficiente de variação populacional, e no método de acréscimo e decréscimo, são mostrados na **Figura 8**.

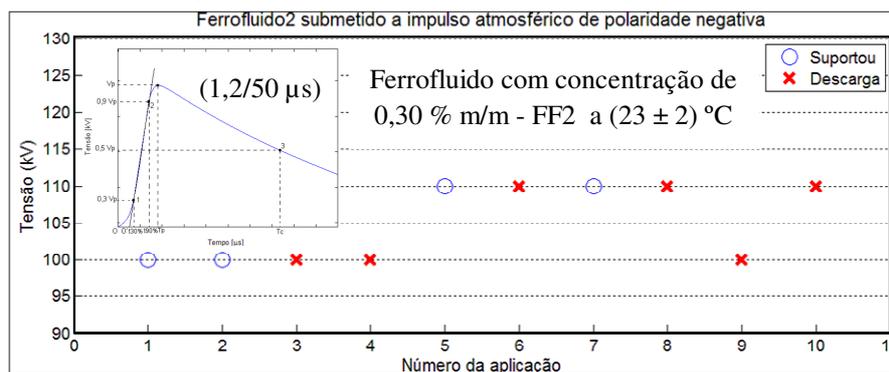


FIGURA 8 – MÉTODO DE ACRÉSCIMO E DECRÉSCIMO (UP & DOWN)

Todos os fluidos foram submetidos aos impulsos atmosféricos de polaridade negativa e positiva. Os resultados encontram-se sintetizados na **Figura 9**.

Analisando-se os resultados, pode-se afirmar que a adição de nanopartículas de magnetita, para as três concentrações analisadas, reduz a rigidez dielétrica do OMI ao impulso em polaridade negativa. Analisando-se os mesmos resultados para a polaridade positiva, na **Figura 9**, verifica-se que a suportabilidade dielétrica dos ferrofluidos não diminuiu significativamente com a concentração de nanopartículas ferromagnéticas. Nota-se, ao contrário, um leve aumento da suportabilidade dielétrica em polaridade negativa com a adição de nanopartículas. Os resultados obtidos sugerem a existência de uma faixa de concentração de NPF ótima. Este comportamento foi verificado em investigações experimentais de outros laboratórios ^{(1),(2)}.

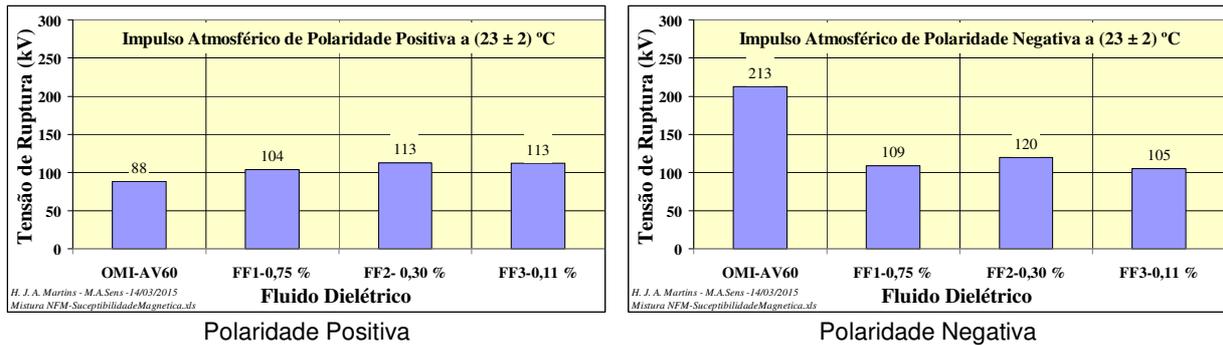


FIGURA 9 – SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA DOS FLUIDOS SUBMETIDOS A APLICAÇÕES DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS.

Por outro lado, a aplicabilidade destes resultados de polaridade positiva constitui restrição, visto que, em torno de 85 a 95 % das vezes, em estruturas menores que 100 m, como em linhas de transmissão, as descargas atmosféricas ocorrem de modo descendente e de polaridade negativa ^{(17), (18)}.

Observou-se, ainda, que outros ensaios necessitam ser realizados para melhorar a avaliação dos efeitos da presença das nanopartículas ferromagnéticas e da polaridade da descarga na suportabilidade dielétrica do OMI.

4.0 - CONCLUSÃO

A metodologia utilizada na presente investigação experimental mostrou-se eficaz e se constitui em importante ferramenta para comparação das características eletromagnéticas e dielétricas destes novos materiais destinados à competição com o óleo mineral isolante utilizado atualmente em transformadores elétricos.

A caracterização eletromagnética mostrou que a suspensão do óleo mineral isolante com nanopartículas de magnetita resultou paramagnética, elevando-se linearmente a susceptibilidade magnética com a elevação da concentração de nanopartículas. A amostra com 0,3% m/m de nanopartículas no OMI não apresentou significativas alterações na constante dielétrica e uma redução de apenas 4 % em sua rigidez dielétrica, quando comparado com o OMI AV60; todavia, houve um aumento da ordem de cem vezes no fator de dissipação, conforme **Figura 6**.

Nos ensaios de rigidez dielétrica sob condições de impulso, aparentemente, a adição de nanopartículas de magnetita, nas concentrações investigadas, contribuiu para o aumento da tensão disruptiva com polaridade de descarga positiva, mas houve apenas 28 % de acréscimo, contra 100 % citado pela literatura ⁽²⁾. Por outro lado, pode-se afirmar que as nanopartículas tiveram um efeito deletério sobre a tensão disruptiva com polaridade de descarga negativa, da ordem de -100 %, conforme mostrado na **Figura 9**.

Conclui-se, portanto, que os resultados obtidos nos ensaios de rigidez dielétrica sob impulso atmosférico realizados no CEPEL, com amostras de ferrofluido em três concentrações diferentes, estão em desacordo com outros resultados experimentais publicados na literatura ^{(1) (2)}. Nos trabalhos de Segal e Raj ⁽¹⁾ e de Segal *et al.* ⁽²⁾, os autores verificaram que a presença de nanopartículas no OMI promove um aumento significativo (da ordem de 50%) na tensão disruptiva com polaridade de descarga positiva e pouca ou nenhuma alteração na tensão disruptiva com polaridade de descarga negativa. Analisando os resultados obtidos e aqui apresentados, conclui-se que os ferrofluidos avaliados ainda não constituem substitutos viáveis para óleo mineral isolante em transformadores elétricos, sobretudo de potência. O óleo AV60 com suportabilidade dielétrica de até 230 kV e perfil mais estável quando submetido a aplicações de impulso atmosférico de polaridade negativa, ainda é a melhor opção dentre os fluidos analisados. Contudo, a proposta inicial, qual seja, avaliar a viabilidade do uso de ferrofluidos como possíveis substitutos ao óleo mineral, foi alcançada.

Uma importante ferramenta de análise, entretanto, surgiu como subproduto das investigações experimentais e que certamente será adotada nas próximas pesquisas envolvendo os nanofluidos magnéticos – a concentração de nanopartículas magnéticas em uma suspensão com o óleo mineral isolante pode ser muito bem determinada pela avaliação da susceptibilidade magnética, sem consumo algum de material e com apenas 5 m³ de amostra. Esta técnica também viabilizou estudos em curso sobre a estabilidade dos nanofluidos magnéticos e possíveis precipitações, sem a movimentação por ações externas da amostra e sem consumo do material sob análise.

Para seguimento dos estudos, serão investigadas possíveis variações nas formulações, a verificação das características de transferência de calor das amostras já preparadas e possíveis aplicações outras, distintas das propostas iniciais para o uso em transformadores elétricos.

Por fim, deve-se registrar que os resultados apresentados e as conclusões extraídas dos mesmos são válidos apenas para as amostras de ferrofluidos preparadas no CEPEL, com as técnicas de dispersão empregadas e descritos neste Informe Técnico.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (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) 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 (ERAC), 19 a 23 de Maio, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.
- (8) SINGH, A. K. Thermal conductivity of nanofluids, *Defence Science Journal*, New Delhi, Vol. 58 (5), 2008.
- (9) DAS, S. K., CHOI, S. U. S., YU, W. e PRADEEP, T. *Nanofluids - Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008.
- (10) 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.
- (11) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Resolução ANP nº 36 – Regulamento Técnico ANP nº 4/2008, publicado DOU de 08.12.2008, “Especificações dos óleos minerais isolantes tipo A (naftênico) e tipo B (parafínico)”.
- (12) SENS, M. A., UETI, E., FILHO, F. 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 nanofluid, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, August 24-29, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2014.
- (13) IEC 60156 Ed. 2.0 b:1995, *Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method*.
- (14) ASTM D924-08. *Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids*.
- (15) ASTM D 3300–00. *Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils of petroleum origin under impulse conditions*.
- (16) NBR IEC 60060-1. *Técnicas de ensaios de alta tensão, parte 1: definições gerais e requisitos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2013.
- (17) COORAY, V. *Lightning protection*. 2010. (IET power and energy series, 58).
- (18) HILEMAN, A. R. *Insulation coordination for power systems*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 1999.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Francisco de Assis Filho, possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (1982). Mestre em Ciências, em Eng^ª. Metalúrgica e de Materiais, pela UFRJ (2008). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras - CEPTEL). Tem experiência na área de Engenharia Química e de Materiais, com ênfase em Envelhecimento de materiais dielétricos e Extensão de vida útil.