



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

FI/GTM/16
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIII

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

ÓLEOS MAGNÉTICOS REFRIGERANTES PARA TRANSFORMADORES

**Antonival Lima Albuquerque(*)
ELETRONORTE/ELETOBRAS**

**José Aliezio Amaro Severo
ELETRONORTE/ELETOBRAS**

**Paulo César de Moraes
UnB**

RESUMO

Este artigo aborda a proposta pela substituição dos atuais óleos isolantes por óleos isolantes magnéticos desenvolvidos a partir de óleos isolantes comerciais. A tecnologia desenvolvida foi a dispersão de nanopartículas magnéticas nos óleos isolantes utilizados atualmente. Assim, ao invés de trabalhar com um óleo isolante, trabalhou-se com um óleo isolante magnético, ou seja, um fluido magnético diluído. A introdução das nanopartículas magnéticas ao óleo isolante limitou-se a uma concentração (baixa fração volumétrica) que não altera as características técnicas do óleo no que concerne às suas especificações para operação em transformadores. Este projeto produziu óleo isolante magnético em volume suficiente para carregar um transformador comercial de 15 KVA cujo desempenho está sob avaliação há dois anos, operando com óleo isolante magnético. Comparamos o desempenho deste transformador com outro do mesmo modelo e fabricante, operando com óleo comercial. Enquanto durou o teste, não houve perda das características do óleo isolante magnético produzido. Esta tecnologia encontra-se protegida na forma de depósito de patente junto ao INPI.

PALAVRAS-CHAVE

Óleo isolante, Óleo isolante magnético, Transformador, Nanotecnologia.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores são dispositivos essenciais em qualquer matriz de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Consequentemente, a melhoria da eficiência desses dispositivos deve ser considerada em qualquer programa de agregação de novas tecnologias ao sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Uma das opções mais promissoras nessa direção é representada pela substituição dos atuais óleos isolantes por óleos isolantes magnéticos desenvolvidos a partir de óleos isolantes comerciais. A abordagem tecnológica oferecida nesse projeto baseia-se na dispersão de nanopartículas magnéticas nos óleos isolantes utilizados atualmente. Assim, ao invés de trabalhar com um óleo isolante, trabalhou-se com um óleo isolante magnético, ou seja, um fluido magnético diluído. As nanopartículas magnéticas, à base de ferritas cúbicas, são produzidas por reações químicas de co-precipitação em meio alcalino. Após a precipitação, as nanopartículas magnéticas são recobertas por uma camada molecular compatível com o óleo isolante dispersante. Assim, a cobertura molecular superficial das nanopartículas magnéticas desempenha um papel duplo; primeiro prevenindo a agregação das nanopartículas e, segundo, permitindo a sua dispersão homogênea no óleo isolante. A introdução das nanopartículas magnéticas ao óleo isolante limita-se a uma concentração (baixa fração volumétrica) que não altera as características técnicas do óleo no que concerne às suas especificações para operação em transformadores.

(*) Endereço Ator Responsável Chopping ID – SCN – Quadra 6 – Conjunto A – Bloco B – Sala 1102 – CEP 70716-901 – Brasília – DF Tel: (+55 61) 3429-5356– Fax: (+55 61) 3429-8622– Email: antonival@eln.gov.br

Por outro lado, a introdução das nanopartículas magnéticas ao óleo isolante agrega duas propriedades essenciais para o aumento da eficiência dos transformadores. Primeiro, o processo de troca de calor entre as partes internas e o trocador de calor nas partes externas do dispositivo ocorre não apenas pelo mecanismo de Arquimedes, mas também através da convecção forçada decorrente da ferrohidrodinâmica do óleo magnetizado. Segundo, o acréscimo de nanopartículas magnéticas ao óleo isolante convencional aumenta a rigidez dielétrica do fluido resultante, ampliando assim o limite de operação do dispositivo. Portanto, o efeito combinado dessas duas novas características atua no sentido de aumentar a eficiência do transformador, com impacto relevante para todo o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A proposta aqui apresentada encaixa-se dentro do que se convencionou denominar nanotecnologia, uma vez que o ganho em eficiência do dispositivo é baseado no comportamento de nanopartículas magnéticas dispersas em um meio dispersante e sob a ação de gradientes de campo magnético.

Há, porém, questões técnicas relevantes que devem ser abordadas para garantir o sucesso da aplicação dessa nova tecnologia (nanotecnologia). Um dos aspectos mais relevantes é a estabilidade coloidal do óleo magnético, no que concerne à manutenção da nanopartícula magnética em suspensão, sem agregação, suportando as temperaturas elevadas de operação do dispositivo, por tempos de operação compatíveis com os tempos de manutenção do óleo isolante convencional. A garantia dessa estabilidade coloidal depende, em grande parte, da manutenção da cobertura molecular na superfície da nanopartícula magnética. Portanto, a especificação dessa cobertura molecular, qualitativamente e quantitativamente, é de importância fundamental. A metodologia de trabalho proposta no projeto previu a investigação das características dessa cobertura molecular, usando as técnicas de caracterização estrutural e morfológica. A espectroscopia Raman e Mossbauer para o estudo das propriedades estruturais e morfológicas de nanopartículas magnéticas recoberta por uma camada molecular.

A tecnologia decorrente da utilização desse material em transformadores, embora esteja sendo avaliada por diferentes grupos a nível mundial ainda não está disponível comercialmente. Portanto, o nosso entendimento é que se trata de uma tecnologia original. Do ponto de vista técnico o presente projeto previu (i) a produção de óleo isolante magnético em volume suficiente para carregar transformadores comerciais de 15KVA e (ii) a avaliação do desempenho do transformador comercial operando com o óleo isolante magnético em comparação com o desempenho do transformador operando com o óleo isolante comercial. Do ponto de vista tecnológico o projeto obteve a proteção da tecnologia que foi desenvolvida na forma de depósito de patente junto ao INPI.

2.0 - PRODUÇÃO DE ÓLEO MAGNÉTICO ISOLANTE PARA TRANSFORMADORES

Nesta seção explicamos o processo de produção do óleo magnético isolante para transformadores. Iniciou-se com a preparação de fluidos magnéticos concentrados, cuja fase dispersante foi o próprio óleo isolante comercial já utilizado nos transformadores. Uma vez preparado o fluido magnético concentrado realizou-se a diluição do mesmo no óleo isolante comercial, na concentração adequada (baixa concentração em volume) para a execução dos testes físicos, químicos, físico-químicos e de desempenho no transformador comercial. A preparação do fluido magnético concentrado foi dividida em quatro etapas principais, a saber: (i) precipitação da nanopartícula magnética de ferrita do tipo espinélio (maghemita, magnetita, ferrita de cobalto), (ii) surfactação da superfície da nanopartícula para promover a estabilidade coloidal no meio dispersante (óleo isolante para transformadores) e (iii) dispersão das nanopartículas no óleo comercial na concentração desejada. A precipitação da nanopartícula magnética foi realizada por adição de solução alcalina à solução contendo a mistura.

Seguindo a etapa de precipitação, o material foi caracterizado quanto à composição química e estequiométrica (medidas de absorção atômica), quanto à estrutura cristalina (medidas de difração de raios-X), e quanto à morfologia (microscopia eletrônica de transmissão e microscopia de força atômica). A surfactação das nanopartículas foi feita empregando-se procedimentos já descritos na literatura.

Para obtenção dos fluidos magnéticos à base de óleos isolantes, com concentrações de nanopartículas abaixo de 5% v/v, as nanopartículas surfactadas foram dispersas nos óleos por dois métodos distintos: (i) dispersão das nanopartículas em óleos isolantes comerciais para a preparação de um fluido magnético precursor concentrado, o qual foi diluído no óleo isolante comercial e (ii) dispersão das nanopartículas diretamente no óleo isolante comercial na concentração de nanopartículas a ser utilizada no transformador. O óleo isolante magnético obtido pelos dois métodos foi submetido a tratamentos para a redução do teor de água. A estabilidade coloidal dos fluidos foi investigada na faixa de 50 a 100 °C, em função do tempo de aquecimento. A caracterização das propriedades físico-químicas dos fluidos, tais como teor de água (pelo método de Karl Fischer norma ASTM D1533), ponto de fulgor, resistividade e permissividade elétrica, fator de perda dielétrica, rigidez dielétrica, tensão interfacial e índice de acidez foi feita empregando ensaios padrões para óleos isolantes de acordo com as normas técnicas IEC, ASTM e ABNT. O acompanhamento da adsorção de surfactantes na superfície das nanopartículas magnéticas será realizado por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) usando a técnica de refletância total atenuada. A espectroscopia óptica (VIS) foi também utilizada para avaliação de possíveis alterações de composição/degradação dos óleos em diferentes etapas da preparação e caracterização dos fluidos. O estudo da estabilidade térmica das nanopartículas e dos fluidos foi realizado pelas técnicas de análise termogravimétrica e calorimetria diferencial de varredura.

2.1 A espectrometria Mössbauer e Raman

A espectroscopia Mössbauer é uma técnica bastante tradicional na investigação e caracterização de nanopartículas magnéticas produzidas por reações de precipitação. Nesse aspecto, a investigação do grafting aquoso foi realizada com materiais coletados em todas as etapas de produção do fluido magnético e do óleo isolante magnético. Os resultados Mössbauer foram analisados em comparação com os resultados Raman, para efeitos de calibração. Uma vantagem da espectroscopia Mössbauer é a sua utilização na identificação da fase magnética da nanopartícula.

Neste aspecto, a espectroscopia Mössbauer foi utilizada para monitorar a estabilidade química da nanopartícula magnética quando submetida às condições de temperatura típicas de operação dos transformadores. A quantificação do grafting aquoso na superfície das nanopartículas foi realizada diretamente usando espectroscopia Raman. Entretanto, para a hidroxila ligada à superfície da nanopartícula apenas os modos Raman assimétricos são observados. Estes modos podem ser usados para identificar a espécie química dominante na superfície da nanopartícula e para quantificar o grafting associado a ela. A investigação do grafting aquoso foi realizada com materiais coletados em todas as etapas de produção do fluido magnético e do óleo isolante magnético.

A utilização da técnica de espectroscopia Mössbauer serviu para observar se a amostra apresentava comportamento magnético e em qual temperatura. A figura 1 e 2 apresentam o espectro Mössbauer da amostra SLM (pó de maghemita sem cobertura de AO) na temperatura ambiente e do nitrogênio líquido. (LEITE, 2013)

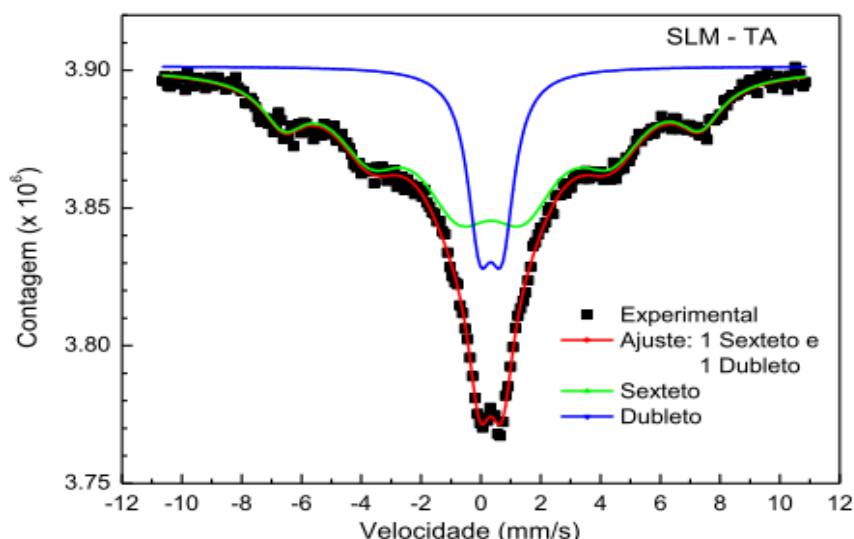


FIGURA 1 – Espectro Mössbauer à temperatura ambiente (300 K) da amostra pó SLM.

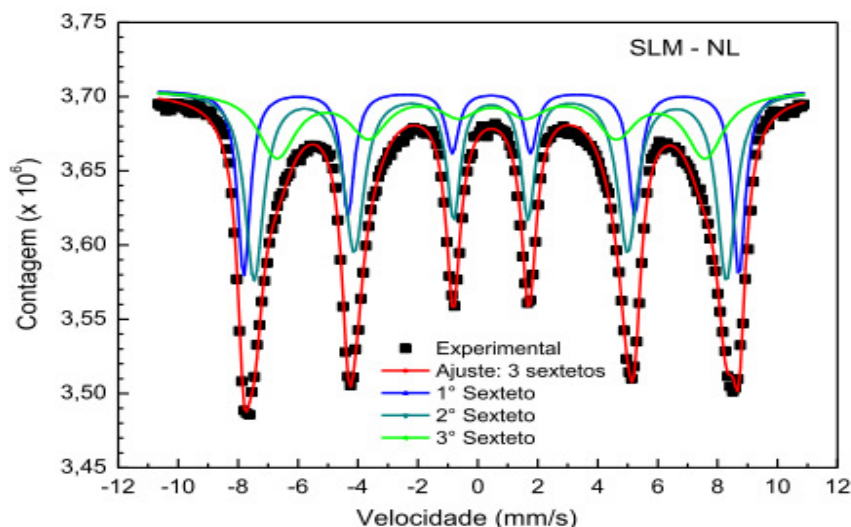


FIGURA 2 – Espectro Mössbauer à temperatura de nitrogênio líquido (77 K) da amostra pó SLM.

2.2 Propriedades Físicas de Óleos Magnéticos Isolantes por Espectroscopia Raman e Mössbauer

A utilização destas duas técnicas permitiu caracterizar magneticamente as nanopartículas dispersas no óleo isolante magnético, através da resposta magnética do óleo à aplicação de um campo magnético externo AC (susceptibilidade dinâmica) e através da resposta à aplicação de um campo magnético externo DC (magnetização). Tais investigações foram fundamentais para a compreensão e ajuste da eficiência do processo de transferência de calor por convecção forçada, em decorrência da magnetohidrodinâmica do óleo isolante magnético dentro do transformador.

A compreensão e a avaliação da eficácia do processo de transferência de calor no transformador deu-se por meio de duas abordagens. Primeiro, através da simulação numérica da ferrohídrodinâmica do óleo isolante magnético sob ação de campos e gradientes de campo magnético. Nesse caso foram simuladas várias condições de campos e gradientes de campo e várias condições de concentração de nanopartículas e suas características magnéticas (susceptibilidade e magnetização) no óleo isolante magnético. O coeficiente de transferência de calor por convecção entre os radiadores do transformador e o óleo isolante magnético foi avaliado experimentalmente pela construção de uma célula magnética com paredes a diferentes temperaturas. As medidas experimentais foram usadas como suporte para validação da análise dimensional desenvolvida para identificação dos principais parâmetros físicos do escoamento. Segundo, através do monitoramento, em bancada de testes, da eficiência de dois transformadores comerciais, um carregado com o óleo isolante comercial e o outro carregado com o óleo isolante magnético. Esta etapa ainda está sendo executada. Nesse caso, os dois dispositivos serão monitorados com relação à distribuição de temperatura quando submetidos a diferentes condições de operação (carga e perfil da tensão de alimentação).

3 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Medidas de magnetização.

Para realizar as medidas da amostra de fluido magnético SL, nas temperaturas de 10 a 300 K, foram utilizadas 34,8 mg de amostra e volume de 0,0586 cm³. Para as medidas de 350 a 450 K foram utilizadas 30,3 mg de amostra. Os ciclos de histerese para a amostra de fluido magnético SL, foram obtidos nas temperaturas de 10, 30, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 e 450 K, figura 3. (LEITE, 2013)

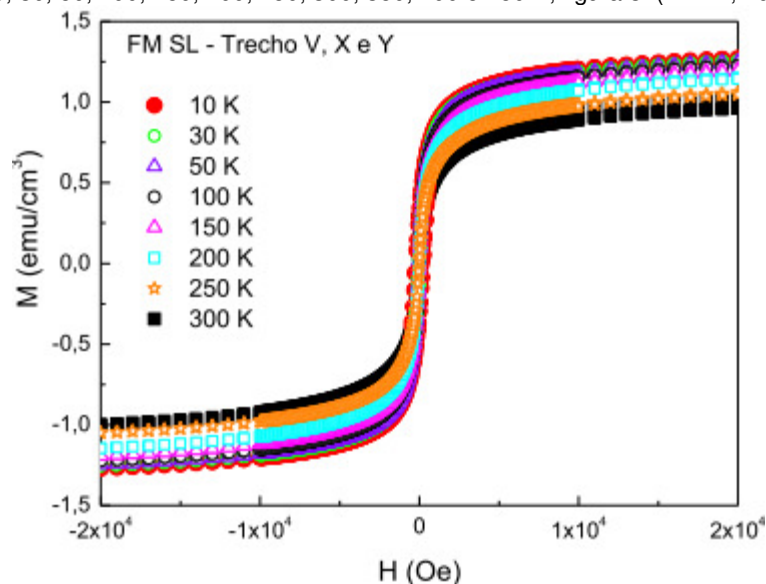


FIGURA 3 – Ciclo de histerese para as temperaturas de 10, 30, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 K, no intervalo de campo de -20 a +20 kOe, trecho V, X e Y, para o fluido magnético SL.

3.2. Estudo das Propriedades Físicas de Óleos Magnéticos Isolantes por Espectroscopia Raman e Mossbauer.

Os ajustes da curva com Lorentzianas, mostram a presença das estruturas em 193, 352, 510, 678, 723, 1046, 1332 e 1409 por cm. As bandas de baixa intensidade a 1046 e 1332 por cm são atribuídas a resíduos de carbono. Para as amostras funcionalizadas com ácido oléico (AO1), o ajuste Lorentziano mostra a presença de estruturas características da fase maguemita, como observado na figura 4(a). (SILVA, 2008)

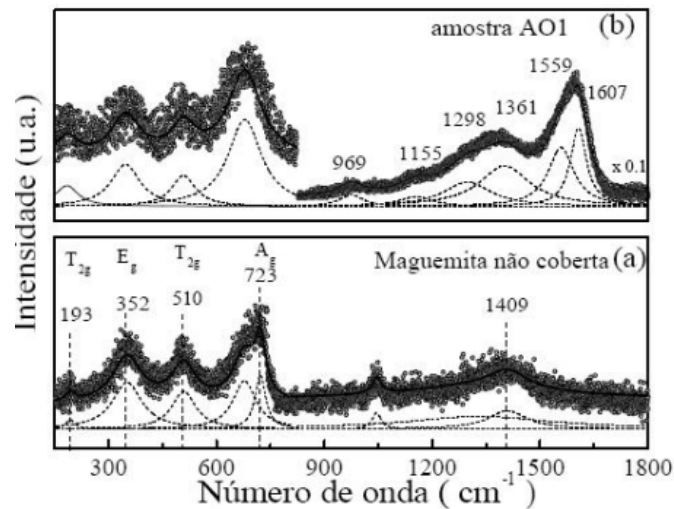


FIGURA 4 – Espectro Raman obtido de nanopartículas magnéticas de Fe_2O_3 não cobertas (a) e recobertas com ácido oléico (b).

3.3. Estudo de nanopartículas e óleos magnéticos isolantes por birrefringência e ressonância 5le05tic

As medidas de EPR, Birrefringência e Susceptibilidade magnética foram feitas em função da concentração de partículas magnéticas nanométricas no fluido: Tipo A e Tipo B. Os fluidos magnéticos do Tipo A foram preparadas em meio aquoso e os do Tipo B foram preparadas em meio oleoso (óleo mineral). Ressalta-se, que os resultados da susceptibilidade magnética para o fluido do Tipo B em função do tempo é diferente do fluido do Tipo A, considerando-se a viscosidade do fluido. A viscosidade é um parâmetro importante no estudo e na aplicação tecnológica dos óleos magnéticos isolantes, objeto de nossa aplicação em transformadores elétricos.

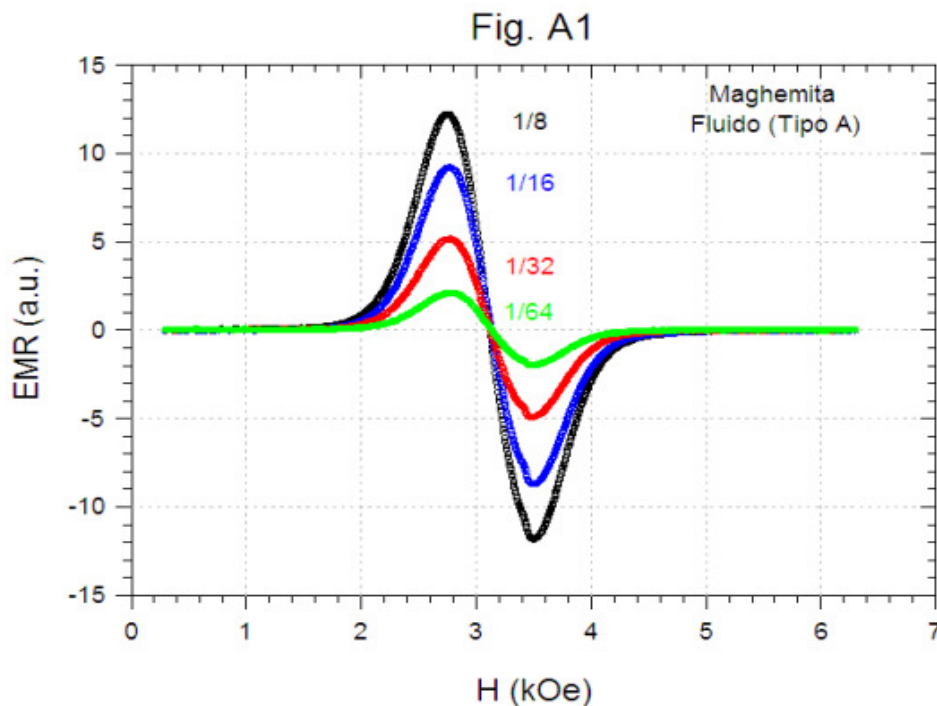


FIGURA 4 – Resultados de EPR, Fluido Tipo A, para diferentes concentrações de partículas magnéticas.

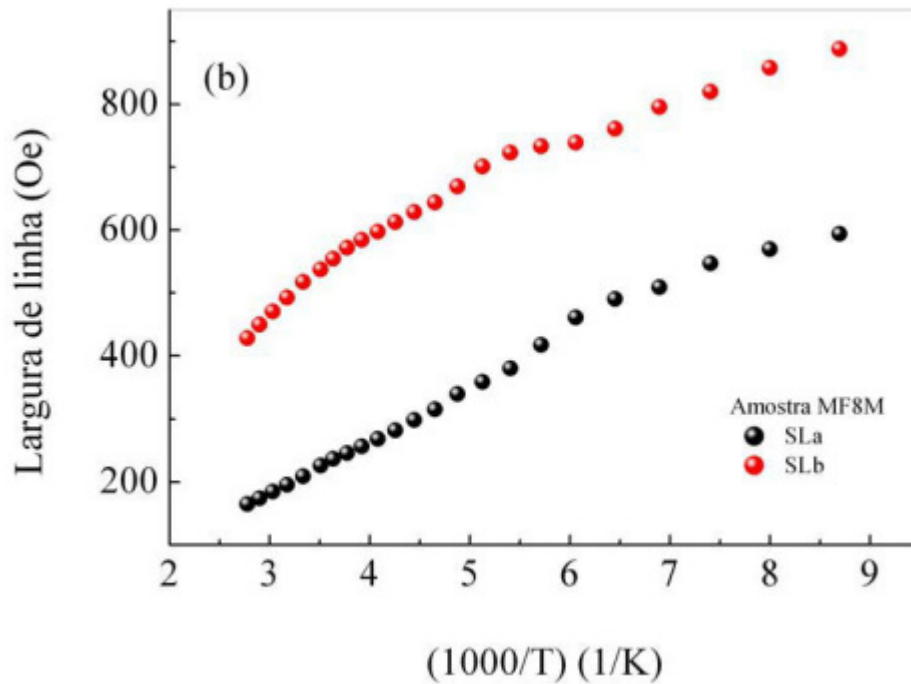


FIGURA 5 – Resultado do comportamento de nanopartículas magnéticas suspensas em óleo mineral em função da temperatura para (a) campo de ressonância e (b) largura de linha de ressonância.

4.0 – ETAPAS EM DESENVOLVIMENTO

O alvo da seguinte pesquisa consiste na avaliação da eficiência de um óleo isolante novel baseado em partículas nanomagnéticas em comparação com um óleo isolante comercial.

a - Equipamentos envolvidos

Conta-se com dois transformadores trifásicos de similares características mecânicas e elétricas apresentadas na tabela 1. Cave ressaltar que estes transformadores contam com um sistema de refrigeração ONAN (oil natural, air natural) o que significa que o sistema de refrigeração externa esta baseado no fluxo natural de ar e a refrigeração interna (refrigeração dos enrolamentos mergulhados em óleo) esta baseada no fluxo natural de óleo.



FIGURA 6 – Transformadores instalados

b – Câmara Infravermelha

O sistema de monitoramento de infravermelho está composto pela câmera FLIR. A 40M. O tipo de detector é uma matriz de plano focal (FPA), micro bolômetro refrigerado (320 x 240 pixels). Para conseguir uma transferência rápida das imagens em tempo real escolheu-se a saída digital IEEE-1394 Fire Wire, com uma máxima taxa de amostragem de 60 FPS, uma sensibilidade térmica de 0.08° a 30°C, um campo de visão e distância mínima focal de 24°x 18°/0.3 m, a no espectro eletromagnético.



FIGURA 7 – Câmara infravermelha

c – Carga elétrica

Precisa-se simular o consumo de energia no transformador elétrico até níveis em que os enrolamentos alcancem um incremento de temperatura de tal forma que a dinâmica do sistema de resfriamento ponha-se em manifesto. Com esse objetivo será utilizado uma fonte de soldagem para o processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) também conhecido como processo TIG. O arco elétrico de este processo finalmente representara a carga elétrica dos transformadores trifásicos. A tensão do arco elétrico de este processo e de corrente contínua (DC) que é fornecido pela fonte de soldagem (ate 13 KVA, máxima corrente 450 A). A fonte de soldagem retifica e estabiliza a corrente alternada trifásica para transformar-la em corrente contínua controlada (ver figura 3.b). Os níveis de tensão de corrente contínua controlada permitem variar a corrente do arco elétrico e pelo tanto também a corrente nos enrolamentos dos transformadores estudados.

d – Amperímetro

Para medir, monitorar e adquirir a corrente de carga utilizou-se um grampo de corrente Fluke i1010. Este dispositivo mede a corrente que circula no cabo através de um sensor de efeito Hall. A saída do sensor apresenta uma sensibilidade de 1mV/A. Este sinal é ligado diretamente na placa de aquisição.

e – Braço de Monitoramento

Para a avaliação do comportamento do óleo isolante sob condições de variações de cargas elétricas, será preciso monitorar o comportamento da temperatura da superfície dos transformadores. O monitoramento será feito mediante a câmera infravermelha FLIR. A 40M, descrita anteriormente. Esta câmera precisa ser instalada frontalmente ao transformador a ser monitorado. Para isso precisa-se desenhar e construir um suporte que além de alojar a câmera, posa deslocar ela entre um e outro transformador. O controle de deslocamento deve ser integrado ao sistema de monitoramento de tal forma que se possa escolher remotamente o transformador a ser monitorado.

5.0 – CONCLUSÃO

O desenvolvimento da tecnologia de produção de óleos magnéticos isolantes para uso em transformadores em escala de alguns litros por batelada, ao contrário da produção recente de frações de litros, e a certificação daquela tecnologia em testes de campo representam, atualmente, o estado da arte da pesquisa tecnológica nesse tema. O presente projeto avançou nessas duas direções, com sucesso já comprovado na produção do óleo magnético isolante, incorporando uma solução completamente inovadora para garantir a estabilidade do material. Os testes de campo, visando certificar a tecnologia, estão em curso conforme mostra o cronograma das suas atividades.

Fica, portanto, evidente, o cumprimento das metas estabelecidas no projeto quais foram:

- (1) preparar óleos isolantes magnéticos à base de nanopartículas magnéticas à base de ferritas cúbicas dispersas em óleos isolantes comerciais com teores de água inferiores a 10 ppm, para utilização em transformadores comerciais;
- (2) realizar testes de desempenho de transformadores comerciais carregados com óleos isolantes magnéticos e com óleos isolantes comerciais, com o objetivo de validar a tecnologia apresentada na proposta;

(3) realizar diferentes testes de caracterização de óleos isolantes magnéticos usando espectroscopia Raman, espectroscopia Mössbauer, Microscopia de alta-resolução, difração de raios-X, absorção atômica, espectroscopia no infravermelho e no visível, análises termogravimétrica e calorimétrica, medidas de susceptibilidade magnética, magnetização, resistividade elétrica, permissividade elétrica, fator de perda dielétrica, rigidez dielétrica, tensão interfacial, teor de água, ponto de fulgor e índice de acidez, medidas de viscosidade aparente do óleo isolante magnético em função da fração volumétrica das nanopartículas magnéticas e taxas de cisalhamento;

(4) realizar simulações numéricas e experimentos da convecção magnética e ferrohidrocinâmica de óleos isolantes magnéticos sob ação de campos e de gradientes de campos magnéticos, determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção e do coeficiente de eficácia do processo de transferência de calor em função do número de Rayleigh magnético e da fração volumétrica das nanopartículas;

(5) solicitar o depósito de patente relacionada à temática do projeto.

A meta (2) ainda encontra-se em pesquisa, conforme relatado no item 4.0 deste relatório.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ELIANA, S.L. ESTUDO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE NANOPARTÍCULAS DE MAGHEMITA DISPERSAS EM ÓLEOS MAGNÉTICOS ISOLANTES. Tese de Doutorado (2013)

(2) F. Nakagomi, S. W. Silva, V. K. Garg, A. C. Oliveira, P. C. Morais, A. F. Junior and E. C. D. Lima, "The influence of cobalt population on the structural properties of $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ", J. Appl. Phys. 101, 09M514 (2007).

(3) P. C. Morais, V. K. Garg, A.C. Oliveira, L. P. Silva, R. B. Azevedo, A. M. L. Silva and E. C. D. Lima, "Synthesis and characterization of size-controlled cobalt-ferrite-based ionic ferrofluids", J.Magn.Magn. Mater. 225, 37 (2001).

(4) P.P.C. Sartoratto, A.V.S. Neto, E.C.D. Lima, A.L.C. Rodrigues de Sá, and P.C. Morais, "Preparation and electrical properties of oil-based magnetic fluids", J. Appl. Phys. 97, 10Q917 (2005).

(5) SILVA, R. S. Relatório de Bolsa de Pesquisa, FINATEC (2008).

(6) V. Segal, A. Rabinovich, D. Natrass, K. Raj, and A. Nunes, "Experimental study of magnetic colloidal fluids behavior in power transformers", J. Magn. Magn. Mater. 215,513 (2000).

7.0 – DADOS BIOGRÁFICOS

Antonival Lima Albuquerque é engenheiro de projeto e construção sênior da Eletronorte/Eletronorte. Engenheiro Civil pela UnB, especializações pela UNICAMP e MACKENZIE e um Mestrado pela UCB. É membro do CGPDI (Comitê Gestor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação) da Eletronorte.