

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE NANOFLUIDOS DE SiO_2 E TiO_2 EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS A ÓLEO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RIGIDEZ DIELÉTRICA

Daniel R. P. Lopes¹, Otávio L. de Oliveira¹ e Marcelo da S. Rocha¹

¹ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP
daniel.lopez@ipen.br, otavioluis@ipen.br, msrocha@ipen.br

RESUMO

Os transformadores elétricos são equipamentos essenciais na distribuição de energia elétrica, pois são utilizados para o fornecimento contínuo de eletricidade. Por este motivo é importante estudar as possibilidades de melhorar seus sistemas de isolamento e refrigeração. A aplicação de nanofluidos em óleos minerais isolantes, que possuem função de resfriamento e isolamento elétrico, é uma questão relevante nesta área. Neste trabalho, são comparadas as características do óleo mineral base utilizado em transformadores elétricos com amostras coloidais (nanofluidos) feitas com o mesmo óleo base utilizando-se diferentes concentrações de nanopartículas de SiO_2 e TiO_2 . As características de condutividade térmica e resistência dielétrica do nanofluido dependem das concentrações de nanopartículas, porém o fluido deve manter todas as características de isolamento a serem usadas em transformadores elétricos. A análise será realizada através de simulações computacionais usando o software FEMM 2D, aplicando seu módulo de condutividade térmica. Os dados de entrada foram retirados da caracterização de amostras produzidas com diferentes concentrações de nanopartículas de SiO_2 e TiO_2 (usando o mesmo óleo mineral base). Os parâmetros foram aplicados em um modelo computacional de um transformador de 50 kVA, com geometria usual e circulação natural de óleo (por convecção) referenciando transformadores elétricos utilizados no mercado para a conversão de energia. Este artigo apresenta alguns dos resultados de um estudo das propriedades dielétricas e da condutividade térmica de um nanofluido a base de óleo mineral.

Palavras Chave: nanofluidos, transformador elétrico, condutividade térmica, óleo mineral, rigidez dielétrica.

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores elétricos de potência são essenciais no sistema de distribuição de energia, utilizados para o fornecimento de eletricidade em operação contínua, é de grande interesse o estudo de possibilidades para melhoria de seus sistemas de isolamento e resfriamento. Nesse sentido, a aplicação de nanofluidos em óleos minerais isolantes que possuem funções tanto de resfriamento quanto de isolamento elétrico é um tema relevante, e ainda constitui uma inovação na área [1, 2].

Nanofluidos são soluções coloidais formadas por uma dispersão de partículas em escala nanométrica em um fluido base [1]. Neste trabalho foram fabricados e testados dois nanofluidos, que tem como fluido base um óleo mineral dielétrico utilizado comercialmente em transformadores elétricos e foram dispersas, em amostras separadas, nanopartículas de dióxido de silício (SiO_2) e dióxido de titânio (TiO_2). Cada um dos nanofluidos produzidos foram fracionados em três diferentes concentrações diferentes e testados separadamente.

Serão realizadas simulações de condutividade térmica, utilizando o software de elementos finitos FEMM2D com os resultados experimentais obtidos em cada amostra fabricada, para

isso, será tomado como referência um modelo de um transformador de 50 kVA, com circulação natural de óleo (por convecção) e de geometria usual.

Neste trabalho é apresentado um resumo bibliográfico explicitando alguns artigos já publicados que possuem resultados promissores aos objetivos deste, além do procedimento utilizado para a produção das amostras.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em realizar um estudo sobre a aplicação de nanofluidos em transformadores elétricos a óleo e realizar uma análise sobre as características de condutividade térmica e de rigidez dielétrica das amostras de nanofluido. Como objetivos específicos este trabalho terá;

- Análise das amostras previamente fabricadas de nanofluidos com diferentes concentrações de nanopartículas.
- Realização de testes de condutividade térmica, viscosidade e de rigidez dielétrica nas amostras.
- Montagem de um modelo computacional de um transformador de 50 kVA com dimensões de um modelo real utilizado na indústria.
- Realização de simulações computacionais de condutividade térmica baseadas nas características das amostras de nanofluidos obtidas dos testes.
- Análise dos resultados obtidos.

1.2. Justificativa

Este trabalho abrange uma área que ainda está sob muita pesquisa e alguns dos resultados não foram totalmente aplicados à indústria, mas a confirmação da eficácia dos testes pode fazer com que sua aplicação seja cada vez mais considerada.

A necessidade do aprimoramento da dissipação de calor em transformadores elétricos é necessária para que a vida útil de todas as suas partes seja prolongada já que esse é um dos componentes mais caros de uma rede elétrica, diminuindo a frequência de grandes manutenções, riscos de desligamentos forçados e melhorando o desempenho geral na conversão de energia [3].

A utilização de nanofluidos também pode ser considerada em outras áreas, as quais as características específicas de cada fluido poderão trazer benefícios a processos ou equipamentos [2].

1.3 Abrangência

É abordado no trabalho exemplos e características de óleos minerais utilizados atualmente na indústria, as características físicas e funcionamento de transformadores de 50 kVA, desde suas perdas associadas, métodos de resfriamento, e circuitos equivalentes. Além disso, será apresentada a definição, características e aplicação de nanopartículas existentes atualmente na indústria e no meio científico.

A faixa de temperatura utilizada para a análise da transferência de calor utilizando o FEMM2D e os resultados obtidos dos testes de condutividade térmica serão baseada na temperatura real de trabalho de um transformador em regime permanente dentro dos padrões estabelecidos nas especificações do equipamento.

Este trabalho não abrange a fabricação das nanopartículas de SiO₂ e TiO₂, nem testes de nanofluidos em um transformador real de 50 kVA devido ao volume necessário para preencher um equipamento ser muito maior do que a capacidade de produção no laboratório.

1.4 Revisão Bibliográfica

Nanofluidos são potenciais fluidos de transferência de calor, com a adição das nanopartículas na base de óleo mineral isolante. É esperado que todas as amostras apresentem melhora de aproximadamente 4% na condutividade térmica em relação ao óleo puro, pois, apesar da baixa concentração de nanopartículas nas amostras, as nanopartículas de SiO₂ possuem uma condutividade térmica de 1,38 W/mK [4], ou seja, maior do que a do óleo base que possui aproximadamente 0,129 W/mK [5].

É esperado também que a viscosidade não se altere, pois, apesar da adição das nanopartículas ao óleo, elas não devem afetar sua estrutura molecular, mantendo assim uma viscosidade muito próxima à original. Além disso, espera-se que a rigidez dielétrica nas amostras aumente aproximadamente 18% [6], viabilizando a utilização de nanofluidos em transformadores elétricos.

Como as nanopartículas não receberam um tratamento especial de surfactantes durante seu processo de fabricação, é esperado que, caso a amostra fique em repouso, as nanopartículas decantem formando um acúmulo no fundo do frasco visível a olho nu após aproximadamente 3 dias, e então, precisaria ser homogeneizada com o sonificador novamente.

Apesar disso, é esperado que durante o trabalho ideal de um transformador em carga, as correntes de convecção no óleo isolante dentro do transformador elétrico sejam suficientes para manter o nanofluido homogêneo.

2. MÉTODOS

O planejamento do processo foi feito utilizando-se o diagrama de blocos.



Figura 1: Diagrama de Blocos

2.1. Procedimento

2.1.1. Preparação das amostras

Antes de as amostras serem fracionadas do galão de óleo mineral isolante puro para os frascos, toda a vidraria que foi utilizada no processo foi lavada primeiro com a solução sulfocrômica, depois com uma solução de ácido clorídrico e água oxigenada, e em seguida foi lavada com água deionizada e, enfim, secada com um soprador a 500°C até que toda a umidade fosse retirada. A temperatura e a umidade da sala do laboratório também foram controladas e foi tomado nota das condições durante o processo de produção.

Os frascos, vazios e sem tampa, tiveram sua massa mensurada e a massa de cada um foi registrada. Cada frasco foi preenchido com aproximadamente 1,25 L de óleo mineral isolante utilizando uma proveta de vidro de 250 mL e foram novamente pesados para determinar a massa exata do óleo contida no frasco. Cada frasco recebeu uma quantidade de nanopartículas proporcional à massa de óleo contida de respectivamente 0,01%, 0,1% e 1% para cada um dos dois tipos de nanopartículas. Um frasco foi mantido com óleo puro para manter um resultado de controle para comparação com as outras amostras, dessa maneira temos 7 frascos de amostras.

Para a pesagem das nanopartículas foi utilizado um vidro de relógio totalmente limpo e uma balança de precisão da marca Shimadzu, modelo AUY220. Foram pesadas todas as amostras de SiO₂ e despejadas diretamente nos respectivos frascos, em seguida, antes de começarem as pesagens das amostras de nanopartículas de TiO₂, o vidro de relógio foi limpo com água deionizada mais uma vez e seco com o soprador.

Após o fracionamento do óleo e cada um dos frascos conterem a quantidade de nanopartículas respectiva, foi realizada a homogeneização da amostra utilizando um sonicador da marca Eco-Sonics, modelo Desruptor de 500 W, por pelo menos 30 minutos em cada amostra. Para isso, cada um dos frascos com nanopartículas foram colocados dentro do sonicador (um por vez), a agulha do sonicador dentro da amostra a ser homogeneizada, em seguida, o equipamento foi ligado na potência máxima por 10 minutos.

A partir do momento que a amostra esteve por 10 minutos sob processo de homogeneização, sua temperatura foi novamente mensurada com o termômetro de líquidos e, caso fosse preciso, descansou por alguns minutos até que sua temperatura abaixasse e que pudesse completar o total de 30 minutos no equipamento. O objetivo desse processo foi manter a temperatura do óleo abaixo dos 40°C durante todo o processo.

Após a homogeneização das amostras, todas foram fracionadas novamente utilizando uma proveta de 0,1 L. Foi retirado de cada frasco 0,25 L de um total de 1,25 L, e este novo fracionamento foi guardado em um novo frasco de volume total 0,25 L.

Isto foi feito devido ao volume de nanofluido necessário para a realização do teste de rigidez dielétrica, que é de 1,0 L de nanofluido de cada amostra, ou seja, com os outros 0,25 L de nanofluido de cada amostra foi realizado o teste de condutividade térmica e será realizado o teste de viscosidade. Neste momento é tido as quantidades de amostras conforme a tabela 1:

Tabela 1: Quantidades de Amostras Após Segundo Fracionamento

Nanofluido	Volume das Amostras	Concentrações
SiO ₂	1 L	0,01%, 0,1% e 1%
	0,25 L	0,01%, 0,1% e 1%
TiO ₂	1 L	0,01%, 0,1% e 1%
	0,25 L	0,01%, 0,1% e 1%
Óleo Puro	1 L	-
	0,25 L	-

Todas as amostras de 1 L após o teste de rigidez dielétrica serão descartadas e apenas as amostras de 0,25 L serão reaproveitadas para testes posteriores.

2.1.2. Teste de condutividade térmica

Após o segundo fracionamento foi realizado o teste de condutividade térmica utilizando o kit KD2 PRO. Para isso, tubos de ensaio foram preparados com 0,1 L de cada uma das 7 amostras dos frascos de 0,25 L.

Foi utilizada a ponteira KS-1 (também chamada de sonda agulha) para a realização do teste. Para que esse teste fosse realizado com a máxima precisão, foi certificado que não houvesse nenhum tipo de vibração durante a medição, portanto, foi realizado em uma sala e em um horário onde havia pouco movimento e fosse livre de qualquer vibração ambiente, também era necessário que a sonda agulha estivesse devidamente fixada à tampa a qual foi encaixada no tubo de ensaio.

A sonda agulha foi passada através de um furo na tampa e mergulhada dentro da amostra de óleo, ficando bem fixa durante o tempo de realização do teste que dura em média 1 a 2 minutos e o resultado é mostrado no visor. Esse teste foi repetido 5 vezes para cada uma das amostras e o valor médio de condutividade térmica será considerado.

2.1.3. Teste de viscosidade

O teste de viscosidade foi realizado utilizando um viscosímetro da marca Brookfield, modelo DV-I Prime. Esse modelo utiliza *spindles* de diversos tamanhos para determinar a viscosidade do fluido onde este está imerso, com precisão de 1% da escala total de medição baseada no conjunto *spindle* e velocidade. A escala total de medição, ou FSR (*Full Scale Range*), é apresentada no visor logo após a seleção do *spindle* e da velocidade desejada para a realização do teste. Para realizar a medição, o viscosímetro foi montado e nivelado na bancada, em seguida foi realizada a calibração do motor utilizando a função *AutoZero* do próprio equipamento.

Após a montagem e calibração, o *spindle* S61 foi selecionado e rosqueado no rotor. A velocidade do rotor utilizada foi de 100 RPM e, como o valor do FSR mostrado em tempo real no equipamento estava entre 10% e 100%, o valor foi considerado válido.

Caso o valor da viscosidade medida pelo equipamento fosse inferior a 10% do FSR, um *spindle* maior deveria ser escolhido, e caso o valor fosse igual a 100%, um *spindle* menor deveria ser utilizado. Cada teste foi realizado por 45 segundos para que o valor do torque se estabilizasse e, dessa maneira, fosse assegurada a precisão das medidas obtidas em centipoise (cP) pelo equipamento.

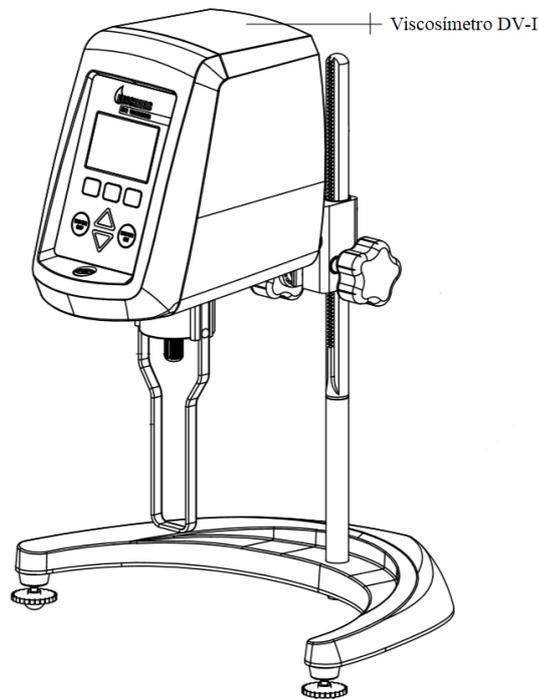


Figura 2: Viscosímetro Brookfield DV-I Prime

2.1.4. Teste de rigidez dielétrica

Para determinar a rigidez dielétrica, o equipamento consiste em uma célula de ensaio, eletrodos, equipamento elétrico e sistema de proteção e é descrito abaixo conforme a NBR 6869.

A célula de ensaio deve ser confeccionada de vidro ou plástico, ser transparente, com volume efetivo entre 300 mL e 900 mL, e construída preferencialmente de forma que nenhuma de suas partes fique a menos de 13 mm de qualquer ponto de ensaio dos eletrodos. Esses devem ser de cobre, bronze, latão, ou aço inoxidável (polidos), na forma de disco com no mínimo aproximadamente 25 mm de diâmetro e com 3,2 mm de espessura.

Os discos devem estar dispostos coaxialmente, na posição horizontal e distanciados entre si de 2,5 mm com a exatidão de 0,1 mm por meio de calibradores, e seu eixo deve ser imerso a uma profundidade de aproximadamente 40 mm conforme mostra a figura 3.

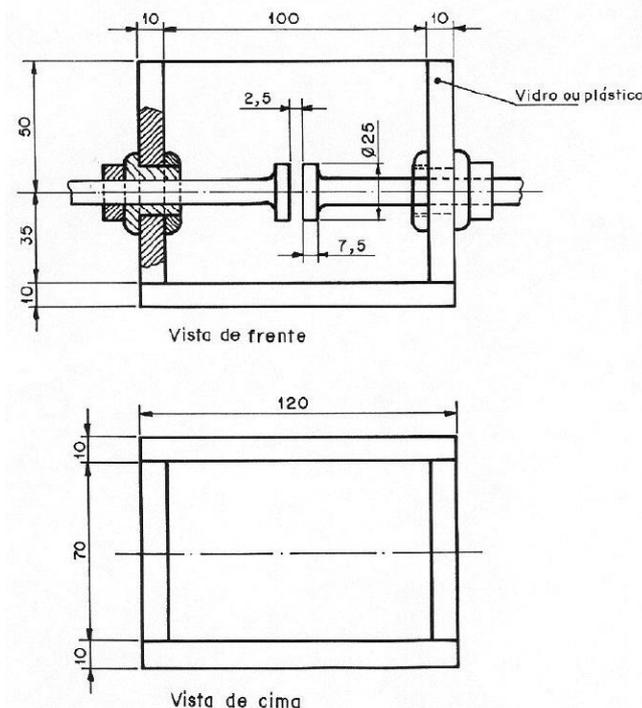


Figura 3: Vistas de Teste de Rigidez Dielétrica

O ensaio consiste em submeter as amostras de nanofluido a uma tensão elétrica sob as condições previstas no método descrito na NBR 6869, determinando-se a rigidez dielétrica como a tensão em que há uma descarga de corrente entre os dois eletrodos do tipo disco, com 2,5 mm de distância entre eles, através da amostra.

Será aplicada uma tensão crescente com frequência de 60 Hz nos eletrodos, sendo o aumento da tensão regular igual a 3 kV/m, partindo do zero até o valor que produza a ruptura através da amostra de nanofluido. A tensão da ruptura é então definida como a tensão atingida durante o ensaio no momento em que ocorrer um arco franco entre os eletrodos.

Serão realizados pelo menos 5 testes em cada uma das amostras para que se obtenha um valor preciso do ponto de ruptura.

O ensaio será composto por cinco ensaios consecutivos, em um único enchimento de célula (0,9 L), com um minuto de intervalo entre cada ensaio para que a rigidez dielétrica volte ao valor original do momento anterior aos testes, portanto, o valor será a média aritmética dos 5 resultados obtidos em cada um dos testes.

3. CONCLUSÕES

Foi apresentado um estudo experimental desde processo de fabricação de nanofluidos com óleo mineral como fluido base e o procedimento de realização dos testes. Como resultados preliminares do teste de condutividade térmica, pôde-se observar, conforme mostrado no gráfico contido na figura 4, um incremento de 1,5 a 2% da condutividade térmica dos nanofluidos de SiO₂ e TiO₂ em relação ao óleo puro considerando que os testes foram realizados a 19°C.

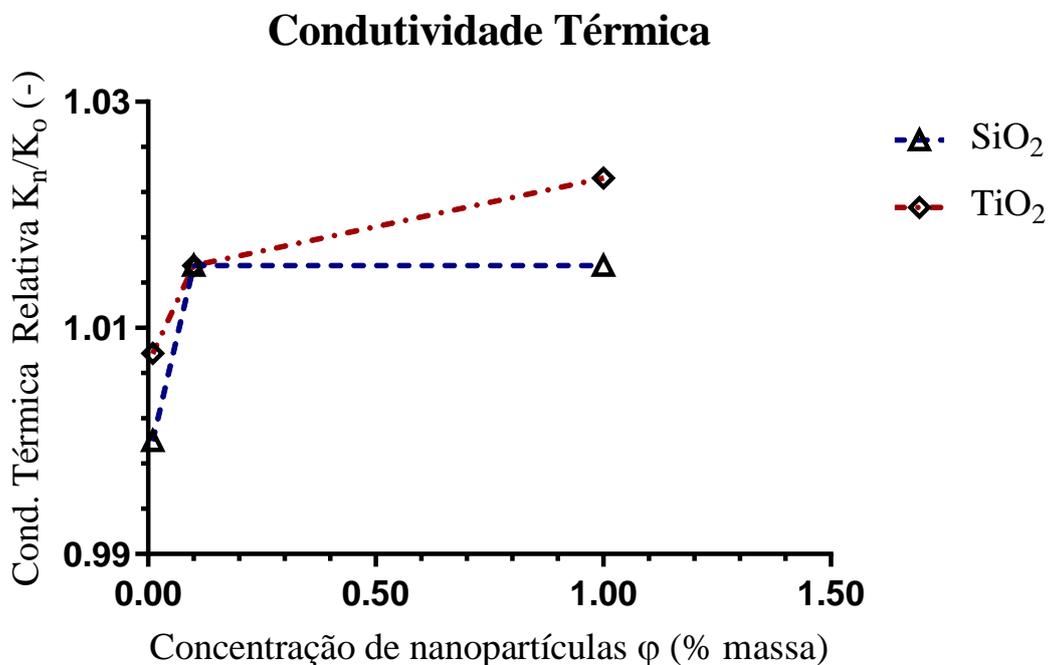


Figura 4: Gráfico da Condutividade Térmica Relativa de SiO₂ e TiO₂

Foi observado também a variação da viscosidade das amostras em relação ao aumento da concentração de nanopartículas em suspensão na base óleo, conforme demonstrado na figura 5. Como resultados preliminares da viscosidade das amostras, foi observado um aumento de aproximadamente 10% nas amostras de SiO₂ com concentrações de 0,01% e 0,1% e um aumento de 102% na amostra com 1% de massa de nanopartículas.

O aumento no resultado da viscosidade da amostra que contém 1% de massa de nanopartículas de SiO₂ se dá devido à grande quantidade de nanopartículas em suspensão, causando uma instabilidade na amostra que, com o movimento rotacional do *spindle*, faz as nanopartículas se agregarem com maior rapidez. A agregação das nanopartículas aumenta a força de arrasto no *spindle* e, conseqüentemente, um resultado maior de viscosidade.

Também foi observado um aumento na viscosidade das amostras de TiO₂. A amostra com concentração de 0,01% de nanopartículas de TiO₂ teve um aumento de 11% na viscosidade. As amostras com concentrações de 0,1% e 1% de nanopartículas tiveram um incremento de 17% e 37% na viscosidade respectivamente e já foi possível observar novamente a instabilidade das partículas em suspensão ao iniciar o movimento rotacional do *spindle*.

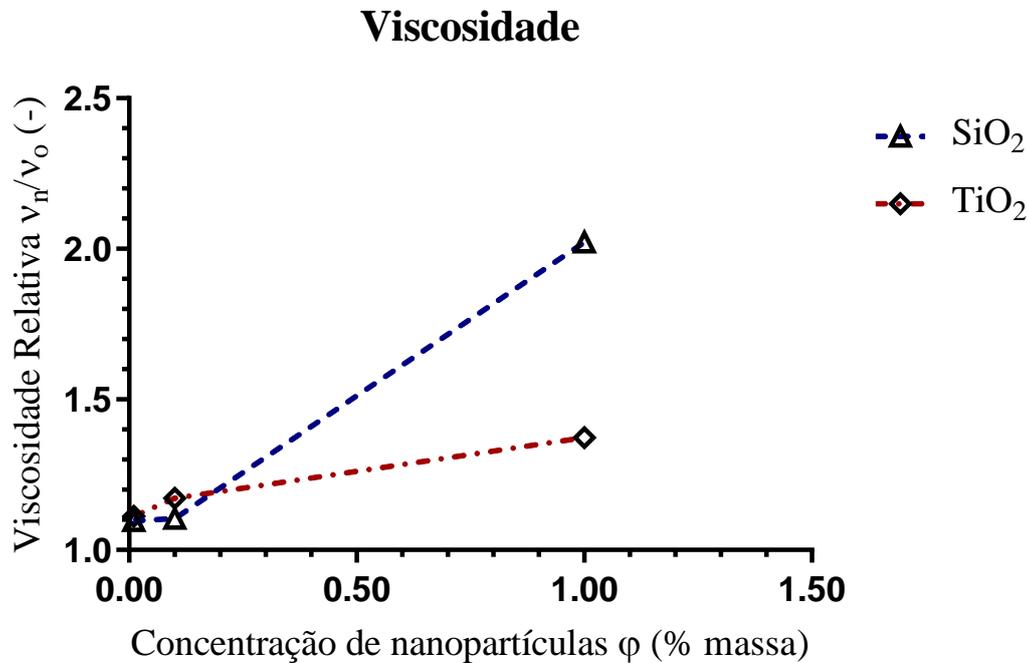


Figura 5: Gráfico da Viscosidade Relativa de SiO₂ e TiO₂

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Engenharia Nuclear (CEN/IPEN) pelo apoio financeiro ao projeto. Ao Dr. Daniel H. G. Espinosa do Instituto de Física (IF-USP) e a meus orientadores Dr. Marcelo da S. Rocha (CEN/IPEN) e MSc. Otávio L. de Oliveira (CEN/IPEN) por todo o suporte e ensinamentos.

REFERÊNCIAS

1. J. Fal et al, “Experimental Investigation of Electrical Conductivity and Permittivity of SC-TiO₂-EG Nanofluids” *Nanoscale Research Letters*, **11**, pp.1-9 (2016).
2. C. Scherer, A. Neto, “Ferrofluids: Properties and Applications” *Brazilian Journal of Physics*, **35**, pp.718-727 (2005).
3. X. Lopez-Fernandez, P. Penabad-Duran, J. Turowski, “Three-dimensional Methodology for the Overheating Hazard Assessment on Transformer Covers” *IEEE Transactions on Industry Applications*, **48**, pp.1549-1555 (2012).
4. I. Tavman, A. Turgut, “Experimental Investigation of Viscosity and Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized Ceramic Particles” *Archives of Materials Science and Engineering*, **34**, pp.99-104 (2008).

5. “DIELECTRICO BI,” <http://ypf.com.br/wp-content/uploads/2015/09/DIELECTRICO-BI.pdf> (2015).
6. D. Fontes et al, “Experimental Evaluation of Thermal Conductivity, Viscosity and Breakdown Voltage AC of Nanofluids of Carbon Nanotubes and Diamond in Transformer Oil” *Diamond and Related Materials*, **58**, pp.115-121 (2015).