

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL  
TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

ARLINDO EDGAR BISCARO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DE  
ISOLAMENTO EM TRANSFORMADORES A ÓLEO  
DE 15MVA – 72,5/15kV**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2014**

ARLINDO EDGAR BISCARO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DE  
ISOLAMENTO EM TRANSFORMADORES A ÓLEO  
DE 15MVA – 72,5/15kV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em automação industrial, da Coordenação de Tecnologia em Automação Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio.

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2014**

ARLINDO EDGAR BISCARO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO  
EM TRANSFORMADORES A ÓLEO  
DE 15MVA – 72,5/15kV**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 20:00 h do dia 05/05/2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio  
Professor Orientador  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Esp. Carlos Aberto Paschoalino  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Esp. Edmar Piacentini Junior  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

Dedico esta Monografia, a Deus, aos meus pais e familiares pelo apoio nesta jornada, em especial minha esposa que sempre me incentivou a ir até o fim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos pela oportunidade de ter conseguido com muito sacrifício e esforço pessoal passar alguns dos meus preciosos anos nesta instituição adquirindo experiência de vida e acadêmica, superando grandes obstáculos.

A minha família, e em especial minha esposa que sempre esteve ao meu lado em momentos bons e difíceis a Deus sempre presente em nossas vidas, aos amigos que caminharam comigo nessa jornada, aos meus professores e principalmente a meu orientador que me forneceu horizontes técnicos para esse trabalho.

## RESUMO

BISCARO, Arlindo Edgar. **Estudo do comportamento da resistência de isolamento em transformadores a óleo de 15MVA – 72,5/15kV.** 2014. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Este trabalho apresenta um estudo aplicado da isolação sólida de transformadores a óleo e seus agentes da massa isolante, verificando-se as distâncias elétricas entre as diferenças de potencial construtivo, o papel isolante, óleo mineral isolante e a umidade ambiente do processo de fabricação. Esse estudo terá como base a medição da resistência do isolamento que reflete valores que definem a condição da isolação e a ausência de umidade mínima na massa isolante dos transformadores. Será apresentada uma análise do princípio e método das medições, verificando tipos de aparelhos, circuito unifilar, locais de medição no transformador, comportamento da medição ao longo do tempo e principalmente a informação resultante da medição sobre o comportamento do papel e óleo isolante a exposição de umidade.

**Palavras Chaves:** Transformadores. Papel isolante. Óleo isolante. Testes e ensaios. Medição da resistência do isolamento. Megômetro.

## ABSTRACT

BISCARO, Arlindo Edgar. **Estudo do comportamento da resistência de isolamento em transformadores a óleo de 15MVA – 72,5/15kV.** 2014. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This work will present an applied study of solid insulation in oil transformers and its agents of the insulating mass being the electrical distances between the differences in constructive potential, the insulating paper, the insulating mineral oil and the ambient humidity of the manufacturing process. This study is based on the measurement of the insulation resistance that reflects values which define the condition of the insulation and the absence of a minimum mass of moisture in insulating transformers. An analysis of the principle and method of measurements will be presented, checking types of devices, single-wire circuit, the transformer measurement sites, behavior of the measurement over time and mainly information resulting from the measurement about the behavior of the insulating paper and the insulating oil to the exposure of the moisture.

**Keywords:** Transformers. Insulating paper. Insulating oil. Tests and assays. Measurement of the insulation resistance. Megohmmeter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Auto indução e mútua indução .....	15
Figura 2: Detalhes núcleo da parte ativa e suas isolações .....	16
Figura 3: Parte ativa .....	17
Figura 4: Tipo de bobina com enrolamento helicoidal .....	19
Figura 5: Tipo de bobina com enrolamento em disco.....	19
Figura 6: Detalhe espaçamento e isolações entre espirais .....	20
Figura 7: Detalhe construtivo dos enrolamentos de disco em transformadores De força classe de tensão 72,5kV .....	21
Figura 8: Linhas de fluxo entre alta e baixa tensão e entre fases H1 e H2 .....	22
Figura 9: Planos equipotenciais entre alta e baixa tensão, parâmetro de Solicitação elétrica para definição das isolações .....	22
Figura 10: Transformador e seus componentes.....	29
Figura 11: Gradientes de Tensão em um transformador.....	29
Figura 12: Megôhmetro na medição do isolamento .....	30
Figura 13: Diagrama unifilar do megômetro – simplificado .....	31



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Orientativa na definição da isolação dos condutores de uma bobina.....	19
Tabela 2 - Classe de isolamentos dos materiais isolantes.....	24
Tabela 3 - Correlação entre estado da isolação sólida e medições de resistência do isolamento .....	34
Tabela 4 - Correção de valores para temperatura de referência.....	35
Tabela 5 - Registros das leituras de resistência do isolamento.....	39
Tabela 6 - Resultado geral e análise das medições resistências com os IP e IA....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da resistência do isolamento ao longo do ensaio entre AT/BT .....	40
Gráfico 2 – Evolução da resistência do isolamento do ensaio entre AT/BT com temperatura 20° C .....	40
Gráfico 3 – Evolução da resistência do isolamento ao longo do ensaio entre AT/M.....	41
Gráfico 4 – Evolução da resistência do isolamento do ensaio entre AT/M com temperatura 20° C .....	41
Gráfico 5 – Evolução da resistência do isolamento ao longo do ensaio entre BT/M.....	42
Gráfico 6 – Evolução da resistência do isolamento do ensaio entre BT/M com temperatura 20° C .....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 OBJETIVOS .....	12
1.2 JUSTIFICATIVA .....	13
1.3 METODOLOGIA.....	13
<b>2 TRANSFORMADORES E SUAS PARTES CONSTRUTIVAS</b> .....	14
2.1 PARTE ATIVA.....	16
2.1.1 Bobinas .....	18
2.1.2 Isolamento dos Transformadores.....	21
2.2 PAPEL ISOLANTE .....	23
2.3 ÓLEO ISOLANTE.....	25
<b>3 RESISTÊNCIA DO ISOLAMENTO</b> .....	28
3.1 PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO DO MEGGER (MEGÔHMETRO) .....	30
3.2 TEOR DE UMIDADE NA ISOLAÇÃO SÓLIDA E ENVELHECIMENTO .....	32
3.3 ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO E ÍNDICE DE ABSORÇÃO .....	33
3.4 IMPORTÂNCIA DA TEMPERATURA.....	35
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	38
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	39
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	44
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

A vida útil operacional de transformadores imersos em óleo isolante está diretamente ligada com o estado da isolação sólida (OLIVEIRA, 1984).

No sistema de isolação de transformadores, o óleo mineral em associação ao papel isolante é o conjunto utilizado em 95% da quantidade total de equipamentos (WALTER RIES, 2002). Este fato pode parecer estranho, face aos recentes avanços na área de materiais sintéticos que, deram origem aos transformadores a seco que à primeira vista deveriam substituir a dupla papel-óleo (WALTER RIES, 2002).

Isso não acontece devido às solicitações elétricas, mecânicas e térmicas no transformador de grande porte exemplo 15MVA, mesmo com os avanços dos materiais sintéticos essas exposições encarecem a fabricação e custo final do transformador. No processo de fabricação de transformadores, ou mesmo durante a operação, a isolação sólida pode adquirir umidade, o que contribui para a diminuição de sua vida útil, caso não seja reduzida a níveis satisfatórios, essa umidade presente na celulose, em níveis elevados, pode ser originada no processo de fabricação dos equipamentos ou adquirida pelo óleo e, posteriormente transferida para a celulose durante a operação do transformador, isso unido a presença de oxigênio atuando como poderoso agente acelerador da degradação do óleo ou do papel reduz consideravelmente a vida útil do transformador. Com isso a atuação de um sistema de monitoramento dessas condições consiste numa ferramenta útil na tomada de decisões. Assim, a medição da resistência do isolamento gera informações fundamentais sobre o comportamento da isolação do equipamento, tendo assim um papel importante no monitoramento e diagnóstico do estado da isolação tanto no processo de fabricação quanto ao longo da vida operacional.

## 1.1 OBJETIVOS

Conforme citado na introdução a resistência de isolamento é um importante diagnóstico para o estado da isolação de transformadores a óleo. Pois a dupla de isolação óleo papel se degrada ao longo da vida útil e também higroscópica durante o processo de fabricação absorvem considerável umidade que se não eliminadas podem comprometer os ensaios e a vida útil do equipamento novo. Além disso, a concepção de projeto o transformador também leva em consideração distâncias elétricas entre as diferenças de potenciais que podem gerar fugas de tensão e consecutiva falha do equipamento, essas distâncias projetadas são amenizadas levando em consideração a capacidade da dupla de isolação papel e óleo podendo ser reduzidas na associação dos mesmos como as isolações entre bobinas de alta e baixa tensão e desses enrolamentos para partes metálicas que deveriam estar aterradas.

Se o isolamento não for adequado para essas tensões, poderão surgir as denominadas correntes de fuga, que estabelecem pelo isolante, que por sua vez ocasionariam perda de potência, estabelecimento de arco voltaico e progressiva deterioração do isolante (TRANSFORMADORES TEORIA E ENSAIOS, 1984).

Portanto a associação da massa de isolação do transformador e suas diferenças de potencial projetadas, associados com a medição da resistência do isolamento nos fornecerá nesse estudo um importante diagnóstico para avaliar o estado da isolação. Para tal deverá ser avaliado a interface medição/transformador, mostrando a atuação do ensaio em função do princípio de medição, tipos de equipamentos de medição, estrutura das matérias primas isolantes utilizadas (óleo e papel isolante) com o estilo construtivo dos transformadores, todos esses expostos a medição de resistência de isolamento evidenciando como essa medição reflete a condição da isolação através de medições reais tabeladas em um transformador de 15MVA.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Esse trabalho auxiliará em pesquisas acadêmicas, e aos fabricantes, pois cada vez mais precisam aperfeiçoar seus processos, tempos de secagem e projeto, como também os usuários finais (cliente), através de um diagnóstico preventivo da condição da associação papel/óleo/distâncias e isolações projetadas. Com isso deixa claro que o ensaio e seu conceito juntamente com medições tabeladas feitas em um transformador de 15MVA, podem ser facilitadores para tomadas de decisão, tanto no processo de fabricação quanto em paradas não programadas de campo.

O diagnóstico no laboratório dos ensaios de campo e nos processos de fabricação são fundamentais para o fabricante quanto o usuário do equipamento na avaliação do produto e sua vida útil. O que contribui para a exposição das falhas de processo de secagem, envelhecimento precoce da massa isolante e principalmente fonte de decisão de intervenção preventiva antes da falha do equipamento seja antes do ensaio e fabrica ou em funcionamento em campo.

## 1.3 METODOLOGIA

Essa pesquisa consiste na busca de informações existentes sobre processo de fabricação, estilo construtivo do transformador a óleo de potência, diferenças de potencial na parte ativa, definições de projeto e distância elétricas, associação de papel isolante e fluído isolante. Ainda apresenta a composição do papel isolante e suas propriedades dielétricas, ensaios em óleo isolante, tratamento de secagem em campo e processo, ensaio de resistência do isolamento, tipos de instrumentos de medição para esse ensaio, princípio de medição e finalmente uma avaliação de medição realizada em um transformador de 15MVA. Para verificar através de medições a condição da isolação deste transformador. O método de pesquisa é bibliográfico, gerando coleta de informações pertinentes ao tema proposto.

## 2 TRANSFORMADORES E SUAS PARTES CONSTRUTIVAS

O termo “Transformador” surgiu pela primeira vez em 1884, com os húngaros Miksa (Max) Deri e Otto Bláthy e o suíço Károly (Karl) Zipernowsky.

As primeiras versões a serem fabricadas foram os transformadores “a seco”. Porém eram instáveis e vulneráveis a temperatura, umidade e intempéries externas, ficando robustos e caros, pois os materiais isolantes da época possuíam baixa rigidez dielétrica (WALTER RIES, 2002).

Por isso o transformador a óleo mineral por um longo tempo foi à versão principal usada para distribuição de energia. Este era e ainda é um componente relativamente simples, duradouro e seguro para este propósito. Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que têm a função de transmitir, mediante um campo eletromagnético alternado, a energia elétrica de um sistema, com determinada tensão, para outro sistema, com a tensão desejada, porém com capacidade e frequência inalteradas (FITZGERALD et al., 2006).

Com base no estudo da resistência do isolamento em transformadores, é necessário entender os conceitos teóricos e construtivos do transformador e suas principais características construtivas que podem ser fontes geradoras de informações úteis para os valores encontrados em uma medição de resistência, sendo:

- a) topologia do núcleo e ferragens;
- b) tipos de enrolamentos e isolações;
- c) características elétricas, classe de tensão;
- d) estrutura de montagem núcleo, ferragens bobinas de baixa e alta tensão.

Para iniciar o estudo desse trabalho, é importante evidenciar dois pontos importantes:

- A relevância desse equipamento no mercado brasileiro;
- E seus conceitos básicos.

Relevância desse equipamento no mercado brasileiro: Estas transmissões

de energia elétrica a longas distâncias o transformador, possibilita elevar as tensões das linhas resultando em uma transmissão viável desta energia. O sistema de transmissão de energia elétrica utilizado no Brasil atualmente são tipicamente de 750kV, 550, 440, 345, 230, 220, 138kV. Até o consumidor a níveis mais baixos de tensão faz necessário o considerável uso desse equipamento, gerando um reflexo econômico acentuado na sociedade exigindo, constantemente, critérios sempre mais avançados de dimensionamento e construção. Informações não oficiais dizem que para cada MVA de potência gerada por uma usina, são necessários de 6 a 10MVA de potência em transformadores para que esta energia chegue ao consumidor final. Nesse percurso do sistema elétrico estes transformadores são locados em subestações das usinas geradoras, em subestações de interligação de sistemas elétricos, em subestações abaixadoras de tensão para alimentação de grandes centros urbanos e industriais e finalmente em subestações de distribuição em baixa tensão industrial, comercial e domiciliar e pública.

Os conceitos de funcionamento do transformador para aplicação no sistema elétrico descrevem todos os equipamentos que envolvem o acoplamento magnético de duas bobinas. Uma bobina primária e outra secundária fazendo a transferência de energia entre elas a certo nível de tensão e corrente por meio de um circuito magnético que realiza o acoplamento desses enrolamentos. Portanto, esses enrolamentos são submetidos a um fluxo variável. Como estão os mesmos acoplados por material magnético, ou seja, regidos pela lei de Faraday, ocorre a mutua indução, estando esses enrolamentos com quantidade de espiras diferentes a mutua indução gera nesses enrolamentos valor de força eletromotriz proporcional ao fluxo que a atravessa. Na figura 1 abaixo é possível verificar esse princípio, que superficialmente rege o conceito básico dos transformadores.

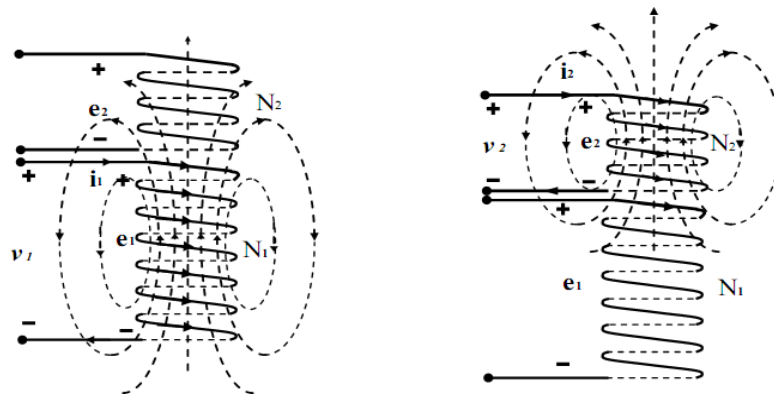


Figura 1: Auto indução e mútua indução  
Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)



## 2.1 PARTE ATIVA

A parte ativa do transformador é um conjunto formado pelos enrolamentos, primários, secundários, e o núcleo. Ela deve ser capaz de suportar condições adversas de funcionamento do transformador.

As bobinas são conhecidas como enrolamentos, que são enroladas em núcleos de ferro. Este enrolamento oferece pouca resistência às linhas de força magnéticas, quase todo o campo magnético do primário se estabelece no núcleo de ferro. O núcleo é formado de chapas de aço-silício, laminadas a frio por uma película isolante. A laminação a frio, seguida de tratamento térmico, orienta os domínios magnéticos no sentido de laminação, permitindo, assim, que sejam alcançadas altas densidades de fluxo magnético com perdas reduzidas. Essas chapas são sustentadas por uma estrutura de aço carbono construídas por vigas e tirantes isolados entre si e o núcleo. Essa isolação quando submetida aos ensaios de resistência do isolamento é verificada a sua performance em manter eletricamente isolado o aço silícios das ferragens, em muitos transformadores de potência, esta estrutura isolada núcleo e as ferragens é interligada externamente para verificação e monitoramento em campo da isolação através da resistência de isolamento. Na figura 2 podem-se verificar as isolações alocadas construtivamente no núcleo da parte ativa do transformador.

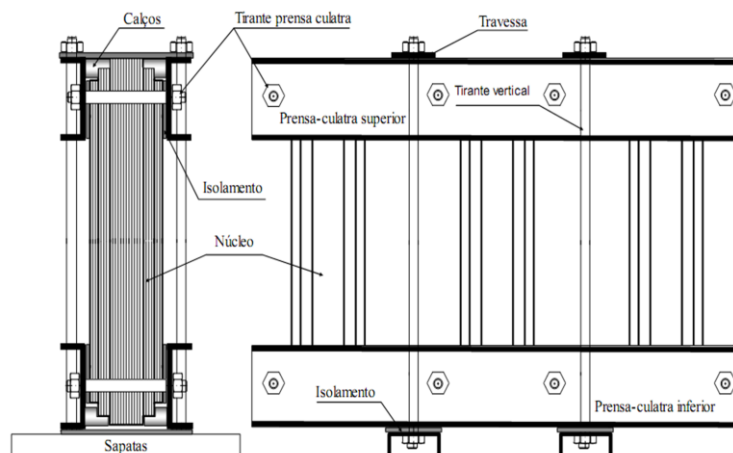




Figura 2: Detalhes núcleo da parte ativa e suas isolações.  
 Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

Já a figura 3 apresenta a parte ativa de um transformador e sua constituição.



Figura 3: Parte ativa  
 Fonte: Dissertação de pós graduação (SOUZA, Denise Cascão Poli)

Segundo Naidu; Karamaju (1996) - Altas tensões são amplamente utilizadas, seja em grandes sistemas de potência, indústrias ou em pesquisas laboratoriais. Cujas aplicações se tornaram essenciais para o desenvolvimento humano. Essa diversidade de situações utilizando grandes potenciais elétricos criou a necessidade de se pesquisar sobre isolamento e os perfis dos campos eletrostáticos. Também Schmidt (1986) já se posicionava que os materiais isolantes também obedecem aos avanços tecnológicos. Entretanto, nenhum material é superior a outro em todas as características. Diferentes dos materiais metálicos os materiais isolantes são de difícil avaliação do ponto de vista elétrico, principalmente os isolantes sólidos

(papéis), que estão sujeitos a uma rápida deterioração nos esforços elétricos e mecânicos com o transformador em operação. Nos transformadores o isolamento é basicamente constituído por celulose tratada. Portanto é importante definir a composição desse material fundamental a vida útil do transformador diante das solicitações que a isolação é submetida durante sua operação. Os elementos básicos da celulose são:

- Carbono;
- Hidrogênio;
- Oxigênio.

### 2.1.1 Bobinas

Quando da confecção e prensagem o núcleo com as ferragens isoladas são montadas em cada coluna de núcleo as bobinas. Em geral, qualquer que seja o tipo de construção do transformador, as bobinas de alta tensão (A.T.) e baixa tensão (B.T.) da mesma fase são colocados na mesma coluna, formando um jogo de duas bobinas por fase do transformador. Pelas suas características elétricas, mecânicas e custo as bobinas também chamadas de enrolamentos são credenciados a parte mais importante do transformador. Eletricamente sua isolação deve ser compatível com a classe de tensão aplicável e a classe térmica de operação como será visto mais a frente nas características dos materiais isolantes. Nos transformadores industriais existem várias maneiras de serem dispostas as bobinas, a fim de se diminuir a dispersão magnética. Conforme a posição relativa em que são dispostas as bobinas A.T. e B.T., obtém-se os dois tipos de enrolamentos que são de bobinas concêntricas ou tubulares e de bobinas alternadas ou de discos (MARTIGNONI,1991).

Nas figuras 4 e 5 pode-se notar os tipos de enrolamento aplicáveis atualmente.

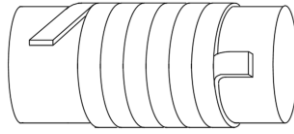


Figura 4: Tipo de bobina com enrolamento helicoidal  
Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)



Figura 5: Tipo de bobina com enrolamento em disco  
Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

Entre as espiras da bobina existe uma isolação prevista em projeto conforme classe de tensão e classe térmica que também são avaliadas no ensaio de resistência do isolamento e está susceptível a absorção de umidade e envelhecimento ao longo da vida útil, o que pode ser observado na Tabela 1. Esta tabela direciona o projeto para definição da isolação conforme nível de tensão.

Tabela 1 - Orientativa na definição da isolação dos condutores de uma bobina.

Nível de Tensão kV	Nível de isolamento (NI) kV	Isolamento bilateral Do condutor mm
15	110	0,5
25	150	0,6
34,5	200	0,7
46	250	0,8
69	350	0,9
92	450	1
138	650	1,5
161	750	1,8
230	950	2,1
345	1.175	2,7
440	1.425	3,2

Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

A figura 6 apresenta o resultado dimensional do espaçamento e isolações entre espiras de uma bobina quando se leva em conta as características elétricas e definição de espaçamentos e isolações de condutores entre as diferenças de potencial.

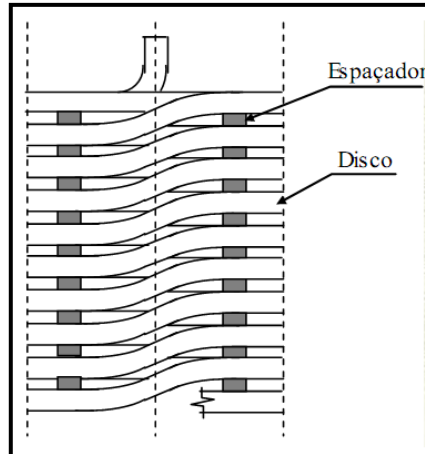


Figura 6: Detalhe espaçamento e isolações entre espiras.  
 Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

Entre camadas o isolamento das bobinas sobressai do enrolamento a fim de criar um caminho superficial maior entre as camadas, e pelos calços da prensagem da bobina. Entre o isolamento, são colocadas tiras de papelão presspan, com espessuras iguais ao diâmetro do fio condutor, coladas com verniz isolante de modo que a cabeceira ficará compacta. Existem bobinas construtivamente de panquecas, estas devem receber um isolamento maior nas cabeceiras, que são observadas na figura 3. Estas panquecas são isoladas com papel Kraft crepado até atingir uma espessura de 0,5 a 2,0 mm, dependendo da classe de tensão do transformador que, normalmente é de 15 a 34,5kV. Os espaçadores vazados entre panquecas normalmente possuem uma espessura de 8 a 10 mm, provendo o isolamento necessário entre as panquecas e o canal de passagem de óleo para refrigeração. Normalmente a tensão de trabalho, por panqueca, não ultrapassa de 2,5kV e a tensão por camada, das bobinas em camadas, é no máximo de 3kV. Para nosso caso de estudo de resistência do isolamento o nível da classe de tensão é de 72,5kV para uma tensão nominal de 72,5kV, para tal esses níveis de isolação as bobinas de panquecas não são praticadas, elas se praticam no processo de fabricação isolações de calços entre discos por transposições que igualam entre as espiras a área ôhmica de cabos utilizados no enrolamento da bobina, abaixo pode-se verificar o estilo construtivo dos enrolamentos de disco em transformadores de força, dessa fabricação e as isolações a serem verificadas no ensaio de resistência do isolamento pode-se notar na figura 7 abaixo para as bobinas fabricadas no transformador estudado nesse projeto.

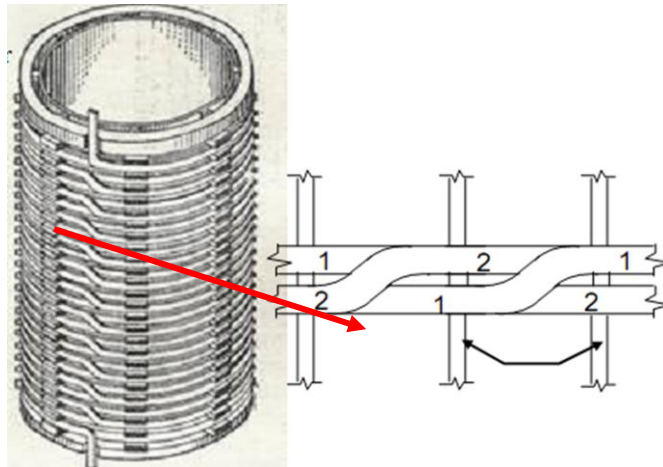


Figura 7: Detalhe construtivo dos enrolamentos de disco em classe de tensão 72,5kV.  
Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

### 2.1.2 Isolamento dos Transformadores

Como apresentado anteriormente massa isolante do transformador papel/óleo são utilizados como isolantes entre espiras de uma bobina, entre bobinas de uma fase, entre bobinas de fases diferentes, entre bobinas colunas e culatras. O papel isolante, também conhecido como isolante sólido, pois nessa família também entra madeiras tratadas, os papéis são à base de celulose, como papel Kraft de alta resistência mecânica, papel crepado, estruturas com papel laminado como o papelão presspan, o madeira tratada, o óleo isolante pode ser a base mineral ou sintética e até vegetal. A verificação da resistência do isolamento de transformadores é fundamental para garantir a suportabilidade dielétrica que os critérios de projeto baseados nos materiais isolantes e classe de tensão dimensionou-se os espaçamentos e isolantes a serem utilizados nos locais já citados acima no equipamento. Isso é muito relevante porque os transformadores quando em operação e ensaios são expostos a esforços elétricos e transientes de tensão que fazem do isolamento um dos pontos mais críticos do projeto. As solicitações internas nas bobinas montadas no núcleo enquanto o equipamento está energizado acontecem eletricamente em virtude do campo elétrico que se forma entre as bobinas primárias e secundárias montadas na mesma fase e montadas em fases diferentes. Na mutua indução a densidade de fluxo formada é muito maior na parte

superior das bobinas, partes essas também conhecidas no processo de fabricação como cabeceiras, sabendo-se disso é possível definir planos equipotenciais entre as bobinas refletindo direto na escolha do isolante a ser utilizada e seu dimensional, levando-se em conta o isolante sólido isento de umidade e imerso em liquido isolante. Na figura 8 é possível verificar a densidade de fluxo e na figura 9 o plano equipotencial das solicitações de diferença de potencial entre as bobinas de primário e secundário, plano esse utilizado como parâmetro para definição da isolação a ser utilizada e espaçamentos a serem definidos na fabricação nos locais de maior solicitação do transformador.

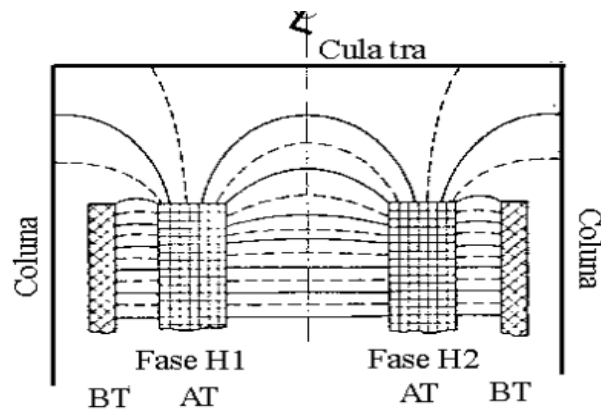


Figura 8: Linhas de fluxo entre alta e baixa tensão e entre fases H1 e H2.  
Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

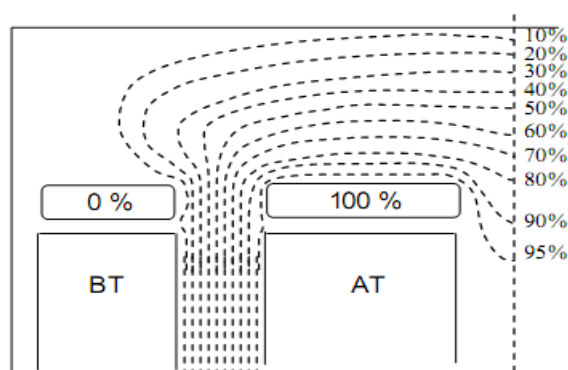


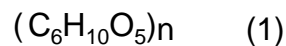
Figura 9: Planos equipotenciais entre alta e baixa tensão, parâmetro para definição das isolações.  
Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

O papel do isolante sólido e liquido no transformador, é que posteriormente vão monitorar sua condição de isolação pela medição da resistência ôhmica.

## 2.2 PAPEL ISOLANTE

Diferentes dos materiais metálicos os materiais isolantes são de difícil avaliação do ponto de vista elétrico, principalmente os isolantes sólidos (papéis), que estão sujeitos a uma rápida deterioração nos esforços elétricos e mecânicos com o transformador em operação. Nos transformadores o isolamento é basicamente constituído por celulose tratada. Portanto é importante definir a composição desse material fundamental a vida útil do transformador diante das solicitações que a isolação é submetida durante sua operação. Os elementos básicos da celulose como: carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H), oxigênio (O<sub>2</sub>).

Esses ligados em uma configuração de núcleo benzênicos formando grandes moléculas. Uma expressão química básica pode ser dada por:



Onde:

- n é o grau de polimerização das moléculas de celulose, variando este de 1000 a 5000;
- C é a molécula da carbono com 6 átomos;
- H é a molécula de hidrogênio com 10 átomos;
- O é a molécula de oxigênio com 5 átomos.

A degeneração do isolamento consiste na degradação do grau de polimerização produzindo, fundamentalmente CO e CO<sub>2</sub> e deixando o isolamento em forma de camadas cristalizadas e friáveis (quebradiças). O valor da tensão de ruptura do isolamento pouco altera com o seu envelhecimento até o instante em que ele se quebra ou destrói pela degradação do grau de polimerização. Nestas condições o isolamento está no fim de sua vida útil. Um dos fatores que mais aceleram a degradação da celulose é a temperatura. Quanto maior é a temperatura de operação do transformador mais rápida será a degradação. Pesquisas realizadas demonstram que os isolantes a base da celulose têm o seu tempo de vida reduzido



à metade para cada 8 a 10 °C de acréscimo da temperatura de operação. Na Tabela 2 apresenta a classificação dos materiais isolantes.

Tabela 2 - Classe de isolamentos dos materiais isolantes.

Classe °C	Designação	Materiais representativos
90	O	Algodão, seda e papel não tratados e não impregnados em óleo.
105	A	Algodão, seda e papel, impregnados, tratados com verniz ou imersos em óleo.
130	B	Mica, asbesto, fibra de vidro e materiais inorgânicos similares, com substâncias aglutinantes adequadas à classe de temperatura.
155	F	Mica, asbesto, fibra de vidro com substâncias aglutinantes adequadas à classe de temperatura.
180	H	Mica, asbesto, fibra de vidro aglutinados com silicone e outras substâncias adequadas à classe de temperatura.
>180	C	Materiais formados inteiramente por mica, porcelana, vidro, quartzo e materiais orgânicos semelhantes.

Fonte: Transformadores (RIES, Walter, 2002)

Como já citado os papéis isolantes são altamente higroscópicos, absorvendo cerca de 6 a 12 % do seu peso em água expostos a um ambiente com 50 a 75 % de umidade. Durante a fabricação a secagem destes materiais durante o tratamento a exige normalmente, muito tempo mesmo com auxílio de processos específicos como é o caso do sistema de secagem com vapor de querosene (Vapour Fase), em temperaturas adequadas e sob vácuo. Mesmos assim, a secagem tem seu limite que é encontrada quando a umidade residual no isolante se depara num estado de equilíbrio com a atmosfera ambiente. Este ambiente pode ser o ambiente de secagem ou o óleo do transformador que também tem capacidade de absorver umidade, porém, com uma capacidade muito menor do que o material isolante. Em outras palavras, no estado de equilíbrio entre o papel e o óleo, este tem 100 a 150 vezes menos água. Isto explica porque é ineficiente tentar a retirada da umidade do isolamento sólido, com o tratamento do óleo do transformador e como será avaliado posteriormente a resistência do isolamento correlacionada com a eficiência dessa secagem (WALTER RIES, 2002).

## 2.3 ÓLEO ISOLANTE

Em um transformador o óleo isolante possui como propriedade o isolamento elétrico, a refrigeração e proteção das partes internas, além de principalmente em grandes volumes ser uma ferramenta importantíssima para diagnosticar as condições do isolamento sólido podendo ser diagnosticado através dos ensaios físicos químicos e cromatográficos (MORA, 2003)

Nesse sentido a interação do óleo isolante com a isolação sólida pode ser também identificada no ensaio de resistência do isolamento, pois valores de isolação detectados associados com os ensaios normatizados do óleo isolante podem refletir diretamente no resultado do ensaio da isolação do equipamento.

O principal componente físico químico monitorado no fabricante de transformador é:

- Rigidez dielétrica – Que é a tensão alternada na qual ocorre a descarga disruptiva. (MILASCH, 1984). Os métodos de ensaio mais utilizado para esse ensaio é o descrito na ASTM D877 com eletrodo de disco, porém o mais recomendado é o método ASTM D1816 VDE com eletrodos tipo calota, porque é mais sensível a impurezas e água dissolvida no óleo mineral isolante.

Os fatores contribuem para diminuição da rigidez dielétrica é a água dissolvido oriunda de umidade na isolação sólida e óleo não tratado e também as partícula sólidas em suspensão oriundas dos materiais isolantes sólidos expostos ao funcionamento e processo de fabricação do transformador como fibras celulósicas, carvão, poeira etc. Outro fator importante a ser conspirado em virtude do ensaio de resistência do isolamento é a correlação da rigidez do óleo com a temperatura, devido a solubilidade de a água crescer com a temperatura, ou seja, quando a temperatura do óleo baixar, uma parte da água passa para o estado livre gerando uma rigidez dielétrica mais baixa, existindo uma troca da água dissolvida entre a isolação sólida gerando valores diferentes de resistência do isolamento com o óleo quente e com óleo frio. Ficando dessa forma: em óleo quente a água migra para isolação gerando resistência do isolamento baixa, óleo frio a água fica em

suspensão migrando da isolação para óleo gerando resistência de isolamento mais alta.

- Teor de água – é um dos maiores inimigos da isolação do transformador o percentual de água. A determinação desse componente reflete o teor de umidade na isolação líquida, porém também fornece um parâmetro do estado de evolução de deterioração da isolação sólida. A unidade de medida desse ensaio é ppm – partes por milhão, ou seja 1ppm de água significa uma molécula de água em 1 milhão de moléculas de óleo. O método de ensaio mais comum é a titulação Karl Fischer que consiste basicamente na oxidação do dióxido de enxofre pelo iodo em presença da água, da piridina e do álcool metílico (MILASCH, 1984).
- Índice de Neutralização – basicamente é o número de KOH, ou seja, uma base, é necessário para neutralizar 1 grama de óleo, alterando a cor da amostra testada com a presença do indicador p-naftolbenzeína em uma solução de KOH de alaranjada para verde com presença de ácido no líquido isolante. Esse índice é uma indicação segura das condições de deterioração do óleo, sendo referenciado como crítico um valor de 0,25mgKOH/g de solução injetada para mudança de coloração da amostra (MILASCH, 1984).
- Fator de Potência – o método utilizado nesse ensaio é ASTM D-924 aplicando tensões a partir de 2500 volts a 10000 volts na célula de teste com a amostra de óleo já aquecida. Durante operação o óleo do transformador aumenta seu fator de potência indicando contaminantes solúveis no óleo além de água quando comparados valores encontrados nas temperaturas de 20°C e 100°C, se o valor encontrado a 100°C ser pelo menos sete vezes maior que em 20°C. Esse associado com a medição do teor de água pode gerar a associação do teor de água na isolação sólida e/ou presença de outros contaminantes incompatíveis com óleo isolante.
- Tensão interfacial - é a tensão de na interface óleo-água medida em dina/cm, identificando substâncias hidrofílicas, ou seja, que tem afinidade tanto com moléculas de água como as de óleo, que nada mais são que produtos que deterioram o líquido isolante provenientes da decomposição

da isolação s3lida ou de todos os outros componentes que o 3leo est3 em contato no tanque do transformador como vernizes, tintas, materiais de limpeza oriundos do processo, principalmente no processo de caldeiraria e jato e materiais sem compatibilidade com a composi33o qu3mica do OIM.

As outras componentes citadas na ABNT NBR 10576 (2006) os fabricantes solicitam relat3rios de ensaio do fornecedor homologando o produto para utiliza33o, esses ensaios citados acima s3o repetidos e confrontados com os valores fornecidos pelo fornecedor do OIM.

### 3 RESISTÊNCIA DO ISOLAMENTO

Quando um material isolante separa dois condutores sobre influência de uma diferença de potencial, surgem correntes de fuga. A resistência de isolamento corresponde à resistência que o isolante oferece à passagem dessa corrente de fuga. Esta corrente pode circular através da massa isolante ou pela sua superfície. À primeira corresponde a resistência de isolamento volumétrica e à segunda a resistência de isolamento superficial. Como todas as máquinas elétricas, os transformadores trabalham segundo uma série de recomendações, observadas por motivo de segurança, melhor funcionamento etc. (OLIVEIRA, 1984).

Assim, em funcionamento, além da diferença de potencial entre as bobinas de alta e baixa tensão, têm-se também tensões desses enrolamentos que não são adequadas para as partes metálicas que estariam aterradas. Se o isolamento não for adequado para essas tensões, poderão surgir as denominadas correntes fuga, que se estabelecem pelo isolante, que por sua vez ocasionariam perda de potência, estabelecimento de arcos voltaicos e progressiva deterioração do isolante.

Além disso, nota-se que, no enrolamento de alta tensão, a diferença de potencial entre uma espira e a seguinte é considerável, exigindo também um bom isolamento, pois, caso contrário poderá surgir um arco entre espiras, danificando o enrolamento. Na figura 10 tem-se a constituição física do anterior do transformador, com identificação mais clara a respeito dos diversos gradientes de potencial que solicitam o isolamento, já na figura 11 há uma representação mais esquemática.

Pode-se dizer que no interior do transformador existem partes, em potenciais diferentes, que não ocasionarão o aparecimento gradientes de potenciais e necessitam isolamento adequado, para que sejam evitadas as correntes de fugas ou mesmo abertura de arcos voltaicos.

No próprio projeto de transformador, o isolamento elétrico é dimensionado de modo a suportá-los. Com tudo, pode ocorrer dos isolantes usados não apresentarem as características desejadas no mesmo que com o decorrer do tempo, devido a um distúrbio qualquer, o isolamento possa enfraquecer em um ponto qualquer. Se o transformador for colocado em funcionamento nessas condições, além da perda de potência haverá sério risco de um curto circuito interno. Tais fatos levam a considerar a necessidade de ensaios que venham a comprovar o estado do

isolamento do transformador.

Os métodos usados para tal fim são: a medição nas resistências de isolamento, com tensão aplicada e tensão induzida.

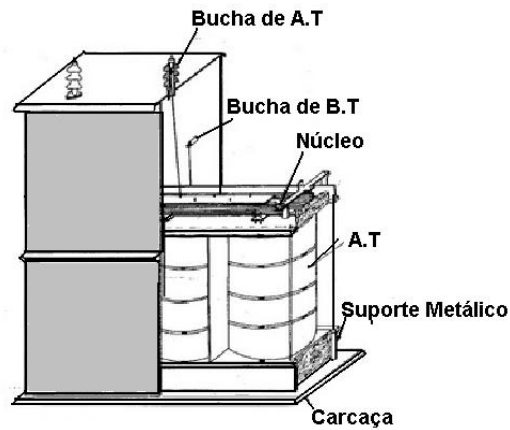


Figura 10 - Transformador e seus componentes.

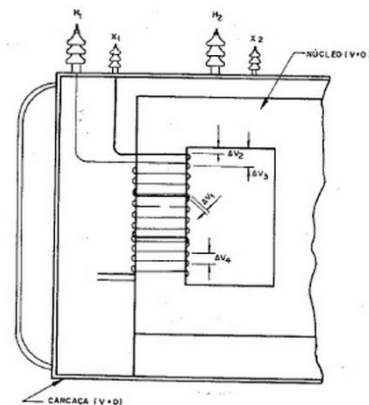


Figura 11: Gradientes de Tensão em um transformadores.  
Fonte: Transformadores teoria e ensaios.

Para se medir a resistência do isolamento utiliza-se um Megger em inglês ou Megôhmetro (MILASCH, 1984) esse instrumento gera valores de medição ao qual serão analisadas no projeto que servirão de parâmetro para verificação da isolação sólida e definição de solicitações elétricas em outros ensaios e/ou em campo.

### 3.1 PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO DO MEGGER (MEGÔHMETRO)

A medição da resistência do isolamento de equipamentos elétricos é de grande valor para detectar, diagnosticar e prevenir falhas da isolação (MILASCH, 1984). Esse instrumento consiste em uma fonte de tensão ligada em serie com um amperímetro. Como a corrente registrada é proporcional à resistência a ser medida, a graduação do amperímetro é feito diretamente em ohms ou, no acaso, em megohms.

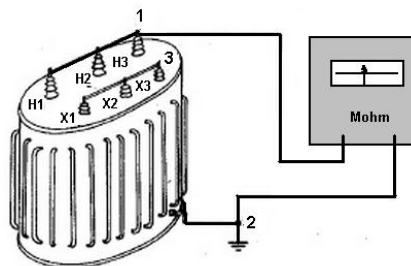


Figura 12 - Megôhmetro na medição do isolamento.  
Fonte: Transformadores teoria e ensaios, 1984

Devido ao inconveniente de alto custo à substituição é feita por fontes de correntes contínuas que fornecem tensões de 500 a 5000V, dependendo do tipo. Nota-se, deste modo, que em muitos casos o uso do megôhmetros é falho pelo fato de se usarem as tensões citadas, que poderão ser muito inferiores à tensão nominal de um determinado transformador a ser ensaiado. A ABNT fixa que a tensão aplicada deverá ser de no mínimo, para os transformadores de classe superior aos 69kV. Quando se mede resistência de isolamento, não é conveniente usar um multímetro (multiteste), pois a sua tensão interna é muito baixa e não produz resultados satisfatórios na medida podendo mesmo conduzir a erros grosseiros. A figura 13 apresenta um diagrama de circuito elétrico de um megôhmetro de forma bem simples e seu princípio de funcionamento.

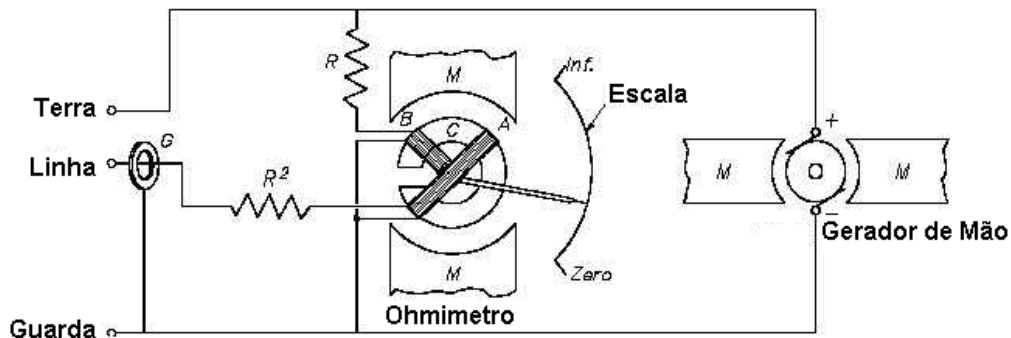


Figura 13 - Diagrama unifilar do megôhmetro – simplificado.

O aparelho é constituído basicamente de um gerador de tensão contínua e um medidor constituído de um ímã permanente com dois pólos (Norte e Sul), na figura identificada por “M”, e um núcleo ferromagnético “C”, onde duas bobinas na disposição indicada estão sujeitas ao campo magnético. Uma bobina “B” recebe diretamente a tensão gerada enquanto a outra “A” recebe a corrente gerada pela resistência a ser medida (que não aparece aqui no desenho, mas está conectada entre “linha” e “terra”), ao ser submetido à tensão gerada pelo gerador. Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, aparece em torno dela um campo magnético tanto mais intenso quanto maior for a corrente que a percorre. Se esse campo magnético está perto de outro, haverá uma força de atração ou repulsão, tanto mais intensa quanto maior for a corrente que circula pela bobina. No caso desse tipo de medidor, existem duas bobinas montadas sobre o mesmo sistema móvel e o campo magnético resultante da subtração dessas duas é quem reage com o campo do ímã fixo. Na figura 13 a letra “A”, é uma bobina que produz no sistema móvel, um torque no sentido horário (sentido de giro dos ponteiros de um relógio). Com os terminais identificados por “linha” e “terra”, curto circuitados (ligados em curto circuito, isto é ligados um ao outro direto, sem nenhuma resistência elétrica), a corrente que flui através da bobina “A” é suficiente para produzir torque bastante para superar o da bobina “B”. O ponteiro então se move para a posição extrema no sentido horário, onde está marcada resistência zero. A resistência  $R^2$  protege a bobina “A” contra a corrente excessiva que flui nessa condição. Quando uma resistência desconhecida é conectada aos terminais de teste “linha” e “terra”, o torque resultante da diferença entre os torques em oposição das bobinas “A” e “B” levam o ponteiro a uma determinada posição da escala. Essa escala é calibrada diretamente em valores da resistência a ser medida.



O terminal “Guarda” ou proteção é usado para em alguns tipos de medida, conectar as partes do circuito ou componente que não participam da medida procurada, para não produzir interferências na medição.

A fonte de tensão, nos megôhmetros de baixa tensão é geralmente de  $500V_{CC}$ , os de alta tensão chegam até  $10000V_{CC}$ . No caso da figura 13 está representado por um gerador de acionamento manual, aqui identificado “gerador de mão”, podendo ser motorizado ou do tipo eletrônico, onde um oscilador eletrônico produz corrente alternada que é elevada por um transformador e retificada, produzindo então os  $500V_{CC}$  e/ou  $10000V_{CC}$ , a partir de pilhas ou baterias de  $9V_{CC}$ , tendo também a possibilidade de ser alimentado pela rede elétrica em 110 ou  $220V_{AC}$ . Deve-se usar um megôhmetro para medir resistências de isolamento devido aos materiais isolantes possuir excelentes características isolação com tensões mais baixas, porém um péssimo isolante para tensões mais altas. Assim quando existe alguma referência a isolantes ela sempre vem associada a classe de tensão que esse isolante vai estar submetido, como os transformadores de força com níveis de tensão acima de  $72,5kV$  objeto de nosso estudo. Assim, temos aparelhos medidores apropriados para a medição de resistência de isolamento para as classes de isolamento requeridas, como megôhmetro de 500V, 2500V e 5000V e até 10000V.

### 3.2 TEOR DE UMIDADE NA ISOLAÇÃO SÓLIDA E ENVELHECIMENTO

O óleo mineral em associação ao papel isolante é o conjunto utilizado em 95% da quantidade total de equipamentos, devido às excelentes características, face às solicitações elétricas, mecânicas e térmicas no transformador.

No processo de fabricação de equipamentos elétricos, ou mesmo durante a operação, a isolação sólida pode adquirir umidade, o que contribui para a diminuição de sua vida útil, caso não seja reduzida a níveis satisfatórios. A umidade presente na celulose, em níveis elevados, pode ser originada no processo de fabricação dos equipamentos ou adquirida pelo óleo e, posteriormente transferida para a celulose durante a operação do transformador.

Papel é um isolante celulósico formado pelos elementos orgânicos Carbono, Hidrogênio e Oxigênio que formam a molécula da celulose, que por sua vez, formam cadeias ou polimerização. O envelhecimento causa a quebra dessas cadeias expresso como um decréscimo do grau de polarização. Como a ligação entre moléculas de celulose consiste de íons  $H^+$  e  $O^-$ , sua ruptura irá formar  $H_2O$  molecular – “Água”.. Está água incrementa o teor de umidade do papel e a cinética deste processo depende diretamente das condições de operação do transformador.

### 3.3 ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO E ÍNDICE DE ABSORÇÃO

A polimerização das moléculas da celulose que estão diretamente correlacionadas com o grau de polarização, ou seja, a correlação do tempo que a celulose ficou exposta á tensão de ensaio de resistência do isolamento.

O grau de polarização é a relação da resistência medida em resistência ao longo de 10 minutos a resistência medida em 60s segundos, sem interrupção da aplicação de tensão com megôhmetro.

A exposição das cadeias dos elementos orgânicos do papel isolante a essa tensão de ensaio faz com que os íons de hidrogênio e oxigênio da celulose se polarizem aumentando o valor isolação em mega ohms ao longo do tempo de medição.

Se a cadeia da celulose estiver rompida esses íons ficarão livres formando água totalmente condutível, diminuindo o valor medido ao longo do tempo e\ou se mantendo estável sem taxa de crescimento, refletindo assim diretamente um ótimo diagnóstico do estado da isolação sólida pela medição da resistência do isolamento fazendo.

O índice de polarização que tem um comportamento típico com celulose em estado novo e outro com a celulose já envelhecida pela ação do funcionamento do transformador expondo o sistema isolante óleo\papel a transientes elétricos do sistema e variações abruptas de temperatura (IRAM, 1992).

A norma Argentina IRAM 2325-1992 tabula valores comparativos para avaliação do estado da isolação sólida por meio da resistência de isolamento e os índices de absorção e polarização, sendo esse encontrado conforme formulas abaixo:

$$IP = \frac{R_{10\min}}{R_{1\min}} \quad (1)$$

$$IA = \frac{R_{60\text{seg}}}{R_{30\text{seg}}} \quad (2)$$

Onde:

IP = Índice de polarização

$R_{10\min}$  = Resistência medida após 10 minutos

$R_{1\min}$  = Resistência medida após 1 minuto

IA = Índice de absorção

$R_{60\text{seg}}$  = Resistência medida após 60 segundos

$R_{30\text{seg}}$  = Resistência medida após 30 segundos

Um aumento apreciável do valor da resistência do isolamento durante o tempo de aplicação continua da tensão é uma indicação de que suas condições são boas. Relação de absorção dielétrica é a relação entre duas leituras de resistência de isolamento feitas em diferentes intervalos de tempo durante a medição. A relação correspondente aos tempos de 10 min. e 1 min. é o índice de polarização. Os valores de relação de absorção dielétrica foram sugeridos por James G. Biddle Co. como orientação para a avaliação das condições de uma isolação elétrica:

Tabela 3 - Correlação entre estado da isolação sólida e medições de resistência do isolamento.

Condição da isolação	Relação	
	60/30s	10/1min
Perigosa	Menor que 1,1	Menor que 1
Pobre	De 1,1 a 1,25	Menor que 1,5
Questionável	De 1,25 a 1,4	De 1,5 a 2,0
Duvidosa	De 1,4 a 1,6	De 2,0 a 3,0
Boa	Acima e 1,6	De 3,0 a 4,0
Excelente		Acima de 4,0

Fonte: Art. "A Stitch In Time", 2006.

Valores de relação índice de absorção e índice de polarizações menores que a unidade não é admissível, pois podem ocorrer quando existem passagens carbonizadas na isolação ou quando ela contém excessiva umidade.

Os índices de polarização do quadro podem também ser utilizados como guia nos testes de equipamentos com liquido isolante, como, por exemplo, transformadores. Nestes casos, ficavam incluídas na medição as resistências das isolações solidas e liquidas. Os valores da tabela 3 são baseados na superposição de que o liquido esta isento de umidade e relativamente livre de ácidos orgânicos borra.

### 3.4 IMPORTÂNCIA DA TEMPERATURA

Normalmente, o valor encontrado refere-se á temperatura ambiente, considerando que a resistência de isolamento é alterada pela temperatura, de modo a comparar o valor lido pelo megôhmetro como o mínimo recomendado, deve-se antes de qualquer coisa colocá-los em uma mesma temperatura corrigindo a resistência encontrada para 75°C medida em qualquer temperatura ambiente. Esse é o método recomendado pela a ABNT. Para tanto, multiplica-se o valor encontrado para resistência medida por um fator de correção dado pela Tabela 4. O resultado corresponderá a resistência de isolamento, para um determinado transformador á temperatura ambiente a uma temperatura de referência.

Tabela 4 - Correção de valores para temperatura de referência

Temperatura (°C)	Fator de correção	Temperatura (°C)	Fator de correção
0	181	41	10,6
1	169	42	9,9
2	158	43	9,2
3	147	44	8,6
4	137	45	8
5	128	46	7,5
6	119	47	7
7	111	48	6,5
8	104	49	6,1
9	97	50	5,7
10	91	51	5,3
11	84	52	4,92
12	79	53	4,59

13	74	54	4,29
14	69	55	4,00
15	64	56	3,73
16	60	57	3,48
17	56	58	3,24
18	52	59	3,03
19	48,5	60	2,83
20	45,3	61	2,64
21	42,2	62	2,46
22	36,4	63	2,30
23	36,8	64	2,14
24	34,3	65	2
25	32,0	66	1,87
26	29,9	67	1,74
27	27,9	68	1,62
28	26	69	1,52
29	24,3	70	1,41
30	22,6	71	1,32
31	21	72	1,23
32	19,7	73	1,15
33	18,4	74	1,07
34	17,2	75	1,00
35	16	76	0,93
36	14,9	77	0,87
37	13,9	78	0,81
38	13	79	0,76
39	12,1	80	0,71
40	11,3		

Fonte: Milasch, 1984.

Também se pode utilizar essa tabela para definição do valor mínimo aceitável de uma medição de resistência do isolamento, pela formula 3 abaixo:

$$R_{i75^{\circ}C} = \frac{V_i}{\frac{S_n}{100} + 100} \quad (3)$$

Em que:

$R_{i75^{\circ}C}$  é a resistência mínima do isolamento a 75°C, para cada fase

$V_i$  a classe de tensão de isolamento nominal do enrolamento considerado (em kV);

$S_n$  a potência nominal do enrolamento considerado em kVA.

Nota-se que os valores mínimos recomendados se referem a uma temperatura de 75°C, que pode não corresponder aquela para a qual se está medindo  $R_i$  com o megôhmetro. Normalmente, o valor encontrado refere-se à temperatura ambiente.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Dentro de toda base teórica descrita foi realizado o estudo de medição da resistência do isolamento em um transformador de 15MVA com classe de tensão 72,5kV no enrolamento de alta tensão e classe 15kV no enrolamento de baixa tensão. Para tal foi selecionado a classe de tensão do megôhmetro respeitando o nível de tensão do transformador, aplicando 10V entre as diferenças de potenciais sendo, o enrolamento de alta tensão contra massa, o enrolamento de alta tensão contra baixa e enrolamento de baixa tensão contra massa, as condições ambientais estavam favoráveis as registradas para devida correção da temperatura de referência. Os dados de placa do transformador foram registrados, porém reservado o nome do fabricante e cliente usuário para pesquisa desse trabalho.

Primeiramente foi curto circuitado os terminais de alta e baixa tensão e eliminado o aterramento da subestação (SE) conectado ao transformador para eliminar interferências capacitivas da malha de terra. Assim que o circuito de medição estava preparado foi verificada a reserva de bateria do megôhmetro estando dentro da faixa de carga iniciou-se a aplicação de tensão pelo lado da alta tensão contra baixa tensão estando a massa conectado ao terminal e guarda e assim consecutivamente para as outras diferenças de potencial já citadas nesse projeto. Com um cronômetro foi registrado para três medições a primeira medição de trinta segundos e a medição de 1 minuto, anotando cada leitura a partir disso minuto a minuto até o tempo limite de dez minutos, gerando a tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Registros das leituras de resistência do isolamento

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO					
EMPRESA:					
SUBESTAÇÃO:					
Data:		Condições Ambientais:	Boas	Temperatura:	28°C
Instrumento de Medição:	Megger Motorizado, Biddle				
Equipamento Ensaiado:	Transformador 3φ				
Potência :	15MVA				
Relação de Tensão:	69/13,8kV				
RESULTADOS OBTIDOS					
AT-BT (GLM)		AT-M (GLB)		BT-M (GLA)	
TEMPO [s]	MEGOHMS	TEMPO [s]	MEGOHMS	TEMPO [s]	MEGOHMS
30	2500	30	1750	30	1200
45	3500	45	2000	45	1350
60	4000	60	2000	60	1500
120	6500	120	2150	120	2250
180	8000	180	2250	180	3000
240	10000	240	2250	240	3500
300	10500	300	2250	300	4750
600	20000	600	2250	600	5000
VALORES CORRIGIDOS PARA 20°C (FATOR DE CORR.:1,73)					
30	4325	30	3027	30	2076
45	6055	45	3460	45	2335
60	6920	60	3400	60	2595
120	11245	120	3719	120	3892
180	13840	180	3892	180	5190
240	17300	240	3892	240	6055
300	18165	300	3892	300	8217
600	34600	600	3892	600	8650
IA=1,60		IA=1,14		IA=1,25	
IP=5,00		IP=1,12		IP=3,33	
OBSERVAÇÕES:					
GLM: GUARDA LIGADO À MASSA					
GLA: GUARDA LIGADO À AT					
GLB: GUARDA LIGADO À BT					
IA: ÍNDICE DE ABSORÇÃO (60s/30s)					
IP: ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO (10min/60s)					

#### 4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nota-se que houve durante o decorrer do tempo um acréscimo da medição de resistência do isolamento.

Na medição entre alta e baixa tensão a resistência do isolamento medida foi de 2500MΩ em 30 segundos para 20000MΩ em 10 minutos, entre alta tensão e massa foi de 1750MΩ em 30 segundos para 2250MΩ em 10 minutos e finalmente entre baixa tensão e massa foi de 1200MΩ em 30 segundos para 5000 MΩ em 10 minutos. Para facilitar a análise foi elaborado os gráficos abaixo para cada medição realizada.

Com as informações do gráfico 1 é possível calcular o índice de absorção e índice de polarização – IP para verificação do estado da isolação compreendida



entre enrolamentos de alta tensão e baixa tensão do transformador estudado.

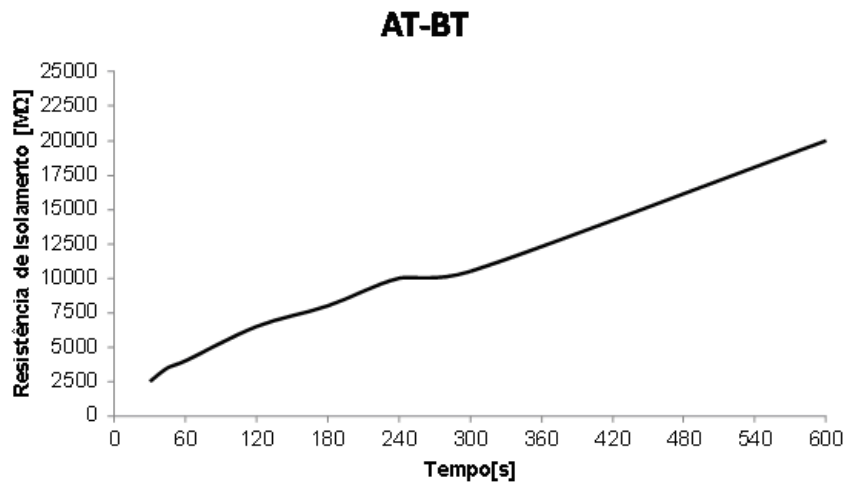


Gráfico 1 – Evolução da resistência do isolamento ao longo do ensaio entre AT\BT.

Aplicando a formula 1 e formula 2 obtém-se o -índice de polarização IP de 5 e índice de absorção de 1,6. Avaliando esses valores conforme parâmetro da tabela 3 a isolação entre enrolamento de alta tensão e baixa tensão estão com status de boa para o IA e excelente para o IP. Essa mesma medição corrigida para 20°C tem-se o seguinte gráfico 2.

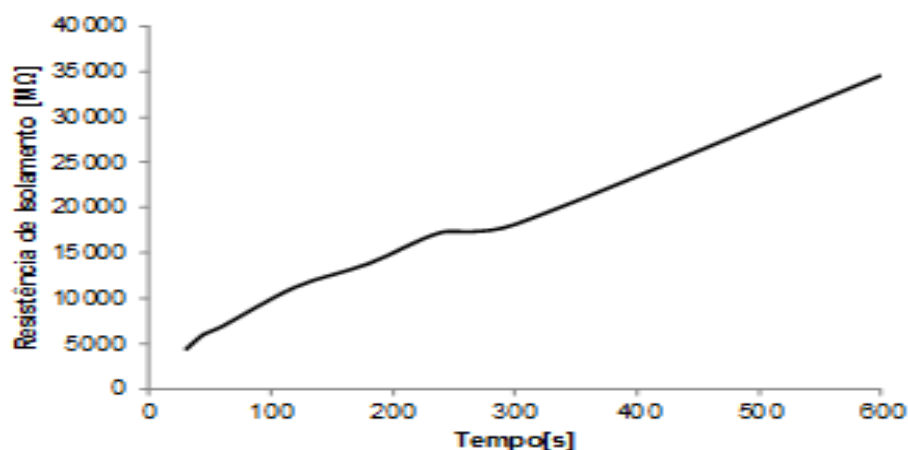


Gráfico 2 – Evolução da resistência do isolamento do ensaio entre AT\BT com temperatura 20°C.

Entre os enrolamentos de alta tensão e massa também foi elaborado um gráfico para visualizar a evolução da medição da resistência do isolamento facilitando a análise das condições de toda essa isolação.

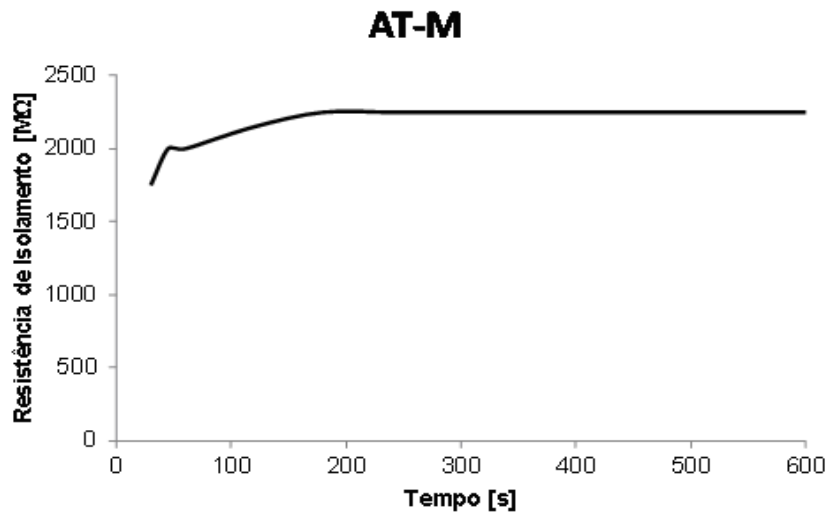


Gráfico 3 – Evolução da resistência do isolamento ao longo do ensaio entre ATM.

Com as informações do gráfico 3 é possível calcular o índice de absorção e índice de polarização – IP para verificação do estado da isolação compreendida entre enrolamentos de alta tensão e massa do transformador estudado. Aplicando a formula 1 e formula 2 temos um IP-índice de polarização de 1,12 e índice de absorção de 1,14. Avaliando esses valores conforme parâmetro da tabela 3, a isolação entre enrolamento de alta tensão e massa estão com status de pobre para o IP e questionável para o IA. E exemplo de medição entre AT/M, também foi corrigido para 20° C e elaborado o gráfico 4.

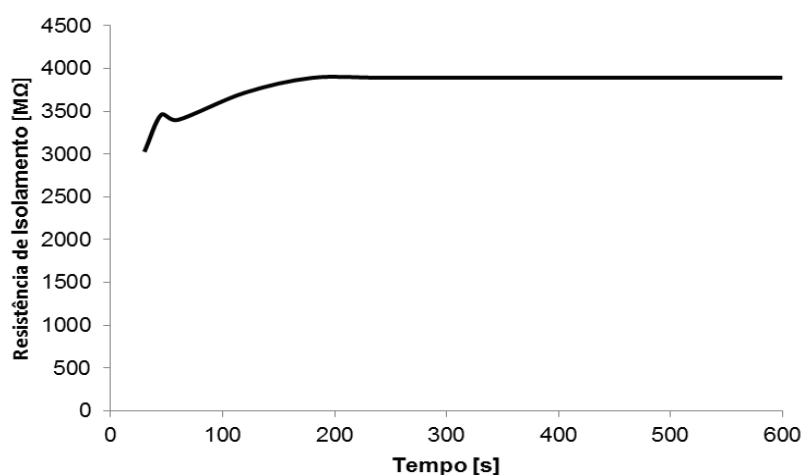


Gráfico 4 – Evolução da resistência do isolamento do ensaio entre AT\M com temperatura 20°C.

Fazendo o a mesma análise para os enrolamentos de baixa tensão e massa temos o gráfico 5 abaixo:

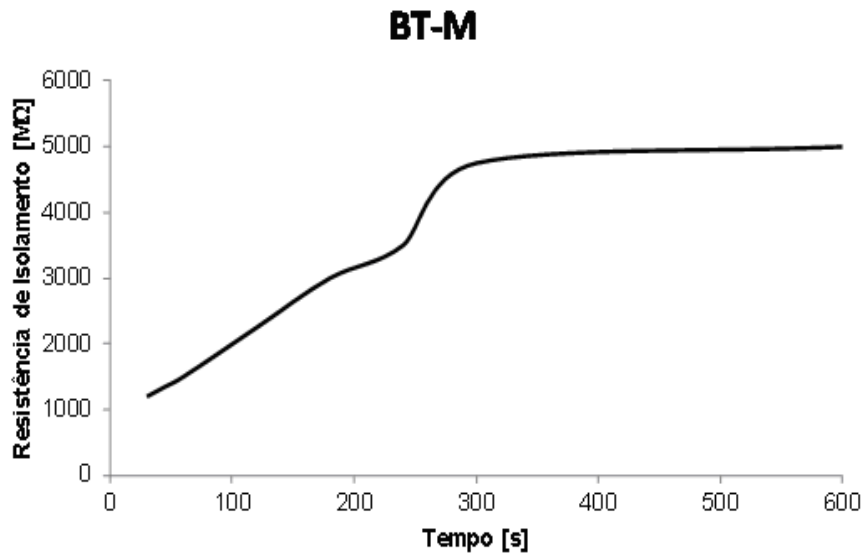


Gráfico 5 – Evolução da resistência do isolamento ao longo do ensaio entre BT\M.

Com as informações do gráfico 5 é possível calcular o índice de absorção e índice de polarização – IP para verificação do estado da isolação compreendida entre enrolamentos de baixa tensão e a massa do transformador estudado. Aplicando a formula 1 e formula 2 temos um IP-índice de polarização de 3,33 e índice de absorção de 1,25. Avaliando esses valores conforme parâmetro da tabela 3, a isolação entre enrolamento de baixa tensão e massa estão com status de boa para o IP e duvidosa para o IA. Corrigindo toda medição para referência de 20° C, temos o gráfico 6.

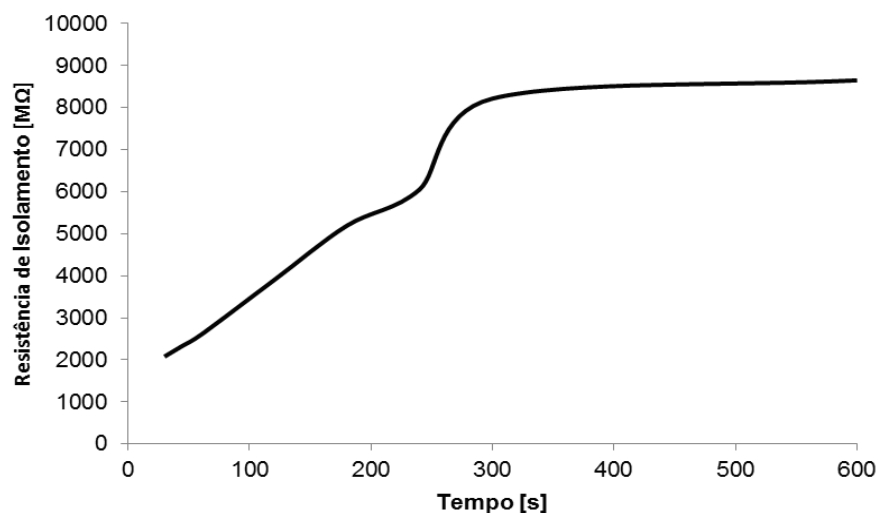


Gráfico 6 – Evolução da resistência do isolamento do ensaio entre BT\M com temperatura 20°C.

Para melhor visualização geral dos resultados das medições a tabela 6 mostra um resumo entre os valores encontrados e seu enquadramento nos parâmetros de análise do estado da isolação entre as diferenças de potenciais do transformador estudado.

Tabela 6 - Resultado geral e análise das medições resistências com os IP e IA

IP E IA – ENROLAMENTO DE AT/BT		IP E IA – ENROLAMENTO DE AT/M		IP E IA – ENROLAMENTO DE BT/M	
ENQUADRAMENTO DO ESTADO DA ISOLAÇÃO		ENQUADRAMENTO DO ESTADO DA ISOLAÇÃO		ENQUADRAMENTO DO ESTADO DA ISOLAÇÃO	
IA=1,60	BOA	IA=1,14	QUESTIONÁVEL	IA=1,25	DUVIDOSA
IP=5,00	EXCELENTE	IP=1,12	POBRE	IP=3,33	BOA

## 5 CONCLUSÃO

A vida útil operacional de transformadores imersos em óleo isolante está diretamente ligada com o estado da isolação sólida.

Os transformadores podem sofrer deterioração diante exposição de umidade durante o processo de fabricação, exposição a intempéries e solicitações elétricas e térmicas durante operação, contato com materiais não compatíveis química e fisicamente. O envelhecimento dessa isolação com a quebra de cadeias de formação de moléculas gera índices de umidade entre papel e óleo.

No sistema de isolação de transformadores, o óleo mineral em associação ao papel isolante é o conjunto utilizado em 95% da quantidade total de equipamentos.

O estudo comprovou que a medição da resistência do isolamento de forma preventiva em transformadores em funcionamento é um relevante parâmetro de determinação dos estados da isolação sólida, sendo base de tomada de decisões. Com os resultados obtidos verificou-se que o material isolante dos enrolamentos de alta tensão e baixa tensão com relação à massa estão em condições que necessitam intervenção e atenção por parte do usuário do equipamento, pois evidencia um presença de umidade considerável refletido nos índices de polarização e absorção, provavelmente correlacionado com outros testes, principalmente no liquido isolante poderá possibilitar um pesquisa que identificará as causas e a tomada de ações de intervenção e parada do equipamento. Ou seja, a medição de resistência do isolamento é um ótimo diagnóstico inicial como parâmetro do estado da isolação sólida em transformadores.

## REFERÊNCIAS

- Art. **“A Stitch In Time” - The complete guide to electrical insulation testing.** Disponível em: <http://www.biddlemegger.com/biddle/Stitch-new.pdf> - 2006. Acesso em 25 de jan. 2014.
- BARROS, A. E. **Redução do nível básico de isolamento para impulso dos transformadores de força.** 19 ed. Revista G.E,19.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: com introdução a eletrônica de potência.** 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- IRAM 2325. Instituto argentino de normatização de materiais, 1992.
- MARTIGNONI, A. **Transformadores.** 8 ed. São Paulo: Globo, 1991.
- MILASCH, M. **Manutenção de transformadores em líquidos isolante.** São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
- MORA, J. F. **Máquinas eléctricas.** 5 ed. Madrid: McGraw-Hill, 2003.
- NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. **High voltage engineering.** 2 ed. EUA: McGraw-Hill, 1996.
- OLIVEIRA, J. C. **Transformadores teoria e ensaios.** São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
- SCHMIDT,W. **Materiais elétricos: Isolantes e Magnéticos.** Vol. 2. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1986.
- SOUZA, D. C.P. **Dissertação de pós graduação falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da celg, nos ultimos 28 anos: um estudo de caso,** 2008.
- WALTER, R. **Transformadores fundamentos de projeto.** Blumenau - SC: UFRG, 2002.
- WEG, **Característica e especificações de transformadores de distribuição e força - DT-11.**