



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica  
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

**Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino**

**Adimarco Representações e Serviços Ltda**

marcelo@adimarco.com.br

**Avaliação do Isolamento de Equipamentos Utilizados na Rede Elétrica de Média e Alta Tensão**

**Palavras-chave**

Detecção de Defeitos  
Equipamentos  
Subestação  
Testes e Ensaios

**Resumo**

Este trabalho apresenta as principais técnicas de avaliação e testes de equipamentos de alta tensão utilizando espectroscopia do dielétrico no domínio do tempo e no domínio da frequência, utilizando diagramas de equilíbrio. Este trabalho também introduz abordagens para medida da umidade e degradação do isolamento em transformadores de potência identificando a resposta do meio dielétrico mediante a aplicação dos testes de Corrente de Polarização e Despolarização e Espectroscopia no Domínio da Frequência. Mostram também resultados de testes realizados.

**1. Introdução**

A instalação de alta tensão torna-se cada vez mais importante. Torna-se imperativo a busca de procedimentos e ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de forma rápida e precisa. Os profissionais envolvidos com as atividades de comissionamento, manutenção, diagnóstico e análise desses componentes têm sofrido crescente pressão para reduzir custos, mesmo sendo forçada a manter antigas instalações em operação por tanto tempo quanto possível. Além do envelhecimento natural das instalações, os equipamentos podem ser solicitados a operar sob diversas condições adversas, tais como: altas temperaturas, chuvas, poluição, sobrecarga e dessa forma, mesmo tendo uma operação e manutenção de qualidade, não se pode descartar a possibilidade de ocorrerem falhas que deixem indisponíveis as funções transmissão e distribuição de energia elétrica aos quais pertencem. Este artigo discute uma abordagem para avaliação da umidade e da degradação do isolamento identificando a resposta do dielétrico através da espectroscopia no domínio do tempo e no domínio da frequência, utilizando diagramas de equilíbrio. A umidade em isolamentos de óleo-papel é uma condição vital para a ocorrência de danos no transformador. O

trabalho também mostra e analisa ensaios realizados em transformadores de potencial e buchas de alta tensão.

## 2. Desenvolvimento

# Espectroscopia do Dielétrico

Espectroscopia do Dielétrico é o nome de um grupo de métodos para medir a polarização das cargas nos materiais, com propriedades dependentes do tempo ou da frequência. Essas propriedades são consideradas as respostas dielétricas dos materiais. Os métodos de espectroscopia são largamente utilizados na área química e tem despertado interesse para a avaliação do isolamento de equipamentos utilizados na rede elétrica de alta tensão. Todo material possui íons livres, além de dipolos elétricos. A aplicação de um campo elétrico determina o reposicionamento dessas. As propriedades elétricas do material dependem de como essas cargas podem se mover sob esta força imposta pelo campo elétrico. Em um elemento condutor, o cobre tem uma resistividade de  $1,72 \times 10^{-8}$  [Wm] a  $20^\circ$  C, e possui cargas livres em grande quantidade, onde um pequeno campo elétrico da ordem de [mV] provoca um grande deslocamento de carga móveis, a corrente de condução. Não há nenhum interesse prático na dinâmica da carga em condutores, pois a corrente da condução é dominante e praticamente instantânea. Em um elemento isolante, como o Polietileno Reticulado (XLPE), por exemplo, tem resistividade de  $10^{16}$  [Wm], tem-se pouca carga livre. Assim um grande campo elétrico, da ordem de KV, pode ser aplicado no material gerando pequena corrente de condução. O efeito do deslocamento dessas cargas é significativo para análise da qualidade do sistema de isolamento.

As cargas não livres podem se mover apenas em pequenas distancias. Isto ocorre no caso da conexão entre elas ser mais forte do que o campo externo aplicado. Quando as partes positiva e negativa dessas cargas são liberadas, elas são deslocadas para o lados opostos do campo. A diferença de potencial que produz o campo é reduzida. A fonte externa que expõe o material ao campo elétrico fornece uma corrente extra que é o proporcional a quantidade de deslocamento de carga no material. Essa corrente geralmente é chamada de corrente de polarização ou corrente de deslocamento. Ela é medida nos métodos de espectroscopia do dielétrico. Esse fenômeno de polarização pode ser avaliado no domínio do tempo ou no domínio da frequência. A polarização eletrônica, também é chamada de “Polarização do Átomo”, está presente em todos os materiais. Isto é consequência do deslocamento do núcleo do átomo e dos elétrons de acordo com a orientação do campo elétrico.



Fig. 1 – Polarização do átomo em um campo elétrico

A polarização de dipolos é resultado do deslocamento da posição média de dipolos permanentes, por exemplo, a molécula de água, de tal modo que eles têm um momento dipolar elétrico. A figura 2a mostra a alteração da polaridade e consequente orientação da molécula de água. Esta rotação, relacionada com a frequência aplicada.

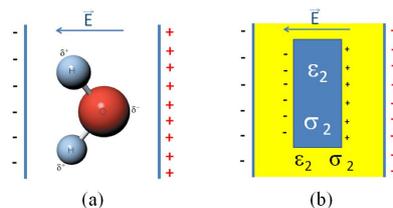


Fig. 2 – (a) Polarização de dipolos em um campo elétrico – molécula de água e (b) Polarização interfacial

No óleo isolante a polarização de segmentos de cadeias poliméricas constituintes desse óleo caracteriza a polarização de dipolos permanentes. Algumas partes da cadeia podem ter ligações simples que permitem a rotação, mas isso requer a superação do estado de alta energia de agregação dos átomos durante esta rotação (Ulf, 1995). Ainda, tem-se a polarização interfacial que ocorre na superfície e nas fronteiras entre os elementos constituintes de um isolamento. Essas interfaces podem ser carregadas, ou seja, os dipolos pertencentes a esses elementos são orientados devido a um campo externo, contribuindo com a polarização do isolamento. Isto ocorre na fronteira entre o óleo do isolamento e o elemento sólido (papel, resina, placa de fenolite, etc.).

## Análise do Isolamento em Equipamentos de Alta e Média Tensão

As equipes técnicas têm especial interesse em determinar a contaminação no isolamento óleo-papel do transformador e buchas devido ao aumento do número de ativos envelhecidos. Esse fato aumenta a possibilidade da ocorrência de umidade no isolamento. Além disso, novas técnicas de medição, como a resposta dielétrica, permitem que as empresas incorporem procedimentos para determinação da umidade em suas práticas de manutenção. O isolamento de transformadores é composto por diversos materiais. Essa estrutura tem influência direta sobre a resposta do dielétrico que pode ser analisada utilizando modelos de sistemas (Tuncer, 2002). Entretanto, para calcular a resposta do dielétrico utilizando modelos é necessário o conhecimento das propriedades dos elementos que constituem todo o isolamento. Apesar de sua complexidade, o comportamento global pode ser razoavelmente bem compreendido com base em considerações geométricas e conhecimento das propriedades dielétricas dos materiais constituintes.

Uma importante aplicação na análise da resposta dielétrica é a avaliação do teor de umidade no papel e no óleo do isolamento do transformador e buchas. A umidade no isolamento óleo-papel causa três perigosos efeitos: ela diminui a rigidez dielétrica do meio isolante, acelera o envelhecimento do papel e provoca a emissão de bolhas em altas temperaturas (Koch, 2007). A decisão sobre as ações de manutenção requerem o conhecimento sobre a real concentração de umidade. O estado da arte das medições de umidade é o diagrama de equilíbrio onde se tenta extrair a medida da quantidade de umidade no isolamento sólido (papel, por exemplo) da umidade no óleo.

## Métodos de Diagnóstico de Umidade

O método de titulação Karl Fischer é um método de análise química que determina a concentração de água em uma amostra usando a titulação volumétrica. Titulação significa basicamente a adição de um reagente de concentração conhecida (título) em uma substância desconhecida até obter o equilíbrio das concentrações. Para a avaliação do conteúdo de umidade no isolamento líquido e sólido, o emprego do método Karl Fischer, além de amplamente utilizado, serve como dado de referência para outros métodos, tais como os métodos de resposta dielétrica. Entretanto este método sempre é afetado por diversas influências, como o ingresso de umidade do ambiente durante a coleta, transporte e preparação da amostra. Isto compromete os resultados e dificulta a comparação com valores referenciais (Koch, 2007), (Lundgaard, 2004).

Buscando uma solução para determinação da umidade, métodos de diagnóstico de dielétricos foram desenvolvidos para deduzir a umidade no papel e realiza a análise das características do isolante (Gubanski, 2004). Os trabalhos da Força Tarefa D1.01.09 do CIGRÉ mostram a validade desses métodos. Estes trazem a promessa de dar maior precisão ao diagnóstico e determinação da umidade no isolamento. Métodos de diagnósticos do dielétrico deduzem o teor de umidade no isolamento sólido empregando os mecanismos de

estabelecimento de correntes polarização e despolarização e fator de dissipação com variação de frequência. Neste trabalho é descrito o método que combina medidas no domínio do tempo e medidas no domínio da frequência. Isto possibilita diagnósticos seguros até mesmo para isolamentos muito antigos. Os diagramas de equilíbrio necessários para a determinação da umidade também são utilizados, mas a aplicação convencional destes diagramas pode levar a resultados errôneos. É mostrada uma representação avançada dos diagramas de equilíbrio que usam umidade relativa no óleo. A saturação relativa do óleo e papel provê medidas fáceis, precisas e contínuas e tem reflexo diretamente no desempenho do isolamento evidenciando o potencial destrutivo de água no isolamento óleo-papel.

## *Medidas das Propriedades Dielétricas.*

A figura 3 mostra a representação do isolamento de um enrolamento em transformador com material sólido (barreiras e espaçadores) e os espaços preenchidos com óleo isolante. Com a aplicação de uma tensão de teste no enrolamento de alta tensão, a corrente flui pelo isolamento principal para o enrolamento de baixa tensão. A ordem de grandeza dessa corrente é de [nA] e [pA].

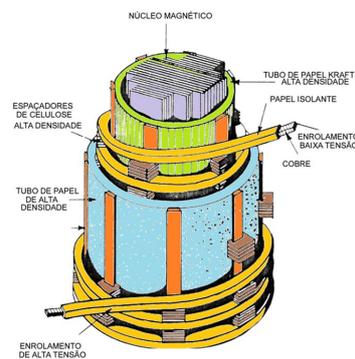


Fig. 3. Representação do isolamento de um enrolamento de transformador (Myers, 2000)

A condutividade do papel e do óleo, além do efeito de polarização interfacial são medidas. A polarização e a condutividade são afetadas pela geometria do isolamento e sua composição. O teste do isolamento consiste na medida da superposição de vários efeitos, tais como as propriedades do papel sozinho e do óleo isolante, mostradas na figura 4. A análise das propriedades dielétricas é dada com a combinação da polarização interfacial no isolamento óleo e papel, combinando suas características.

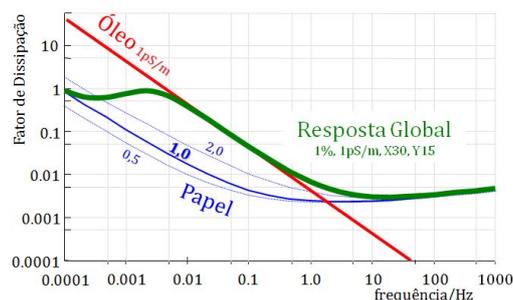


Fig. 4. Fator de Dissipação do Papel e do Óleo e a sobreposição dos efeitos na Resposta Global (óleo+papel)

A resposta dielétrica do isolamento pode ser registrada no domínio do tempo ou no domínio frequência. Uma vez no domínio do tempo tem-se o registro da medida de carga e descarga das correntes pelo isolamento. Este procedimento é conhecido como Corrente de Polarização e Despolarização (Polarization and Depolarization Currents – PDC). As medidas no domínio da frequência são obtidas através das medições de fator de dissipação, com uma larga faixa de frequência, especialmente em baixas frequências. Este procedimento é chamado de Espectroscopia no Domínio da Frequência (Frequency Domain

Spectroscopy - FDS). A combinação com a polarização da corrente no domínio do tempo (PDC) com a medida da espectroscopia no domínio da frequência (FDS) reduz drasticamente a duração do teste comparado com as técnicas existentes (Borsi, 2004).

## *Análise e Interpretação no Domínio da Frequência.*

Métodos de diagnósticos do dielétrico deduzem o teor de umidade no papel de suas propriedades dielétricas tais como correntes de polarização e despolarização, capacitância e fator de dissipação. A umidade influencia fortemente essas grandezas (Paulino, 2009) (Paulino, 2010). O fator de dissipação com variação de frequência mostra uma forma de curva típica em formato de “S”. Com o aumento do teor de umidade, da temperatura ou com o envelhecimento, a curva aumenta para frequências mais elevadas. A umidade influencia tanto em baixas quanto em altas frequências. A parte central da curva com o gradiente elevado (grande variação de valores) reflete a condutividade do óleo. É a parte onde o valor do fator de dissipação decai rapidamente, formando uma rampa para baixo. Antes do decaimento contínuo do fator de dissipação são registradas as condições da geometria do isolamento. Essas condições determinam uma elevação à esquerda do registro da condutividade do óleo. Para a determinação do teor de umidade no isolamento, a medida deve fornecer os dados mais à esquerda da elevação que registra as condições da geometria do isolamento. É a parte do gráfico relativo aos menores valores de frequência, onde domina as propriedades do isolamento sólido. Isto pode ser observado na figura 5.

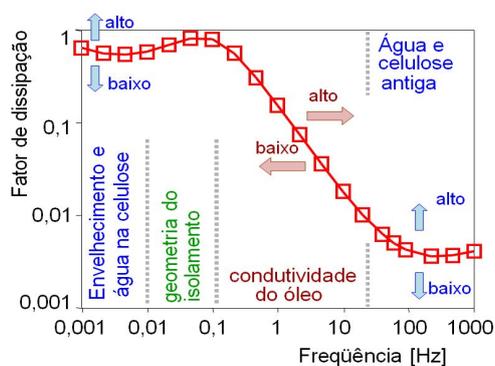


Fig. 5. Interpretação para os dados de domínio da frequência com a discriminação entre as influencias de vários fenômenos físicos (Paulino, 2010).

## **Ferramenta de Teste Utilizada**

Neste trabalho foi utilizado um equipamento chamado DIRANA que combina os métodos de medição FDS e PDC para tirar vantagem de ambos os métodos. Em altas frequências, o fator de dissipação é medido através do método FDS, enquanto em baixas frequências, os resultados obtidos através da medição da corrente de polarização são transformados no domínio da frequência. Assim, as características de fator de dissipação com variação de frequência do são calculadas. Esse conceito único facilita as medições do fator de dissipação dentro de uma ampla faixa de frequência, de 5 KHz a 0,1mHz. Através da comparação da resposta dielétrica das medições com as curvas de modelo baseadas na construção do sistema de isolamento, o sistema de teste fornece, além da medida de umidade, indicações das condições de isolamento (DIRANA, 2010), tais como:

- Teor de umidade no isolamento de papel/óleo,
- Falhas em buchas de alta tensão RIP, RBP e OIP,
- Falhas no isolamento de cabos, motores ou geradores.

# Estudo de Caso – Testes de Aceitação em Fábrica de Transformadores de Potencial

Foram realizados ensaios em fábrica para aceitação de um grupo de transformadores de potencial. A placa de uma das unidades é mostrada na figura 6 a seguir. A figura 7 mostra as unidades sob teste.

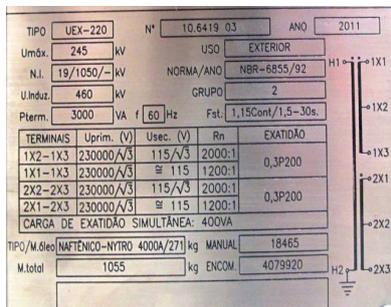


Fig. 6. Placa de uma unidade sob teste, Transformador de Potencial 242kV.



Fig. 7. Transformadores de Potencial ensaiados.

Para a medida da resposta dielétrica, o equipamento utilizado utiliza uma fonte de injeção de sinal e dois terminais de medição. A técnica utilizando o cabo guarda garante a medida sem interferências. Para a medida de transformadores de potencial com dois enrolamentos, após a desconexão da rede, a tensão de saída do equipamento pode ser conectada no enrolamento de alta tensão e a entrada de corrente é conectada no enrolamento de baixa tensão. Neste trabalho são apresentados os resultados de 7 TPs medidos. A tabela 1 mostra os valores de fator de dissipação medidos na frequência de 60 Hz.

TABELA I  
Resultados: Teste em Transformador de Potencial Tan $\delta$

Unidade testada	Fator de Dissipação	Capacitância	Umidade
106417-02	0,17%	253,4225 pF	0,40%
106417-03	0,17%	270,8339 pF	0,40%
106417-05	0,18%	260,9773 pF	0,70%
106417-06	0,16%	279,8402 pF	0,40%
106419-01	0,23%	274,6297 pF	2,80%
106419-02	0,18%	281,5578 pF	0,50%
106419-05	0,18%	254,9143 pF	0,40%

Na figura 8 são mostrados os resultados dos testes de FDS e PDC no domínio da frequência com os valores de fator de dissipação.

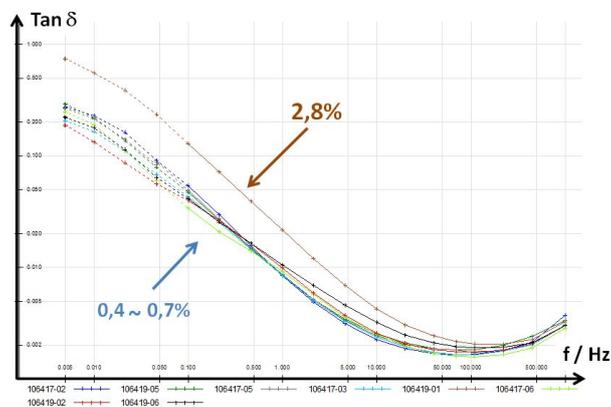


Fig. 8. Testes de FDS e PDC no domínio da frequência com os valores de fator de dissipação.

A tabela 1 e a figura 9 mostram que o grupo testado possui características muito parecidas, resultando em uma medida de umidade entre 0,4% e 0,7% e fator de dissipação em 60 Hz entre 0,16% e 0,18%, exceto pela unidade 106419-01. Este TP apresenta umidade de 2,8% e fator de dissipação de 0,23%. Vale ressaltar que embora o valor do fator de dissipação medido tenha valor adequado para aprovação do equipamento, o valor da umidade resultante aponta para um equipamento moderadamente úmido, de acordo com a norma IEC 60422 (Tabela 2).

TABELA II  
Categorias de Umidade de Acordo com IEC 60422 [13]

Categoria de Umidade	Conteúdo de umidade	
Seco	$u < 2,2\%$	<span style="color: green;">■</span>
Moderadamente úmido	$2,2\% < u < 3,7\%$	<span style="color: yellow;">■</span>
Úmido	$3,7\% < u < 4,8\%$	<span style="color: orange;">■</span>
Extremamente úmido	$4,8\% < u$	<span style="color: red;">■</span>

Como o sistema utilizado combina os métodos de medição FDS e PDC, podemos isolar as medidas de PDC e efetuar a mesma análise no domínio do tempo. A tabela 3 e a figura 9 mostram os resultados considerando somente PDC.

TABELA III  
Testes em Transformadores de Potencial PDC

Unidade testada	Tempo	Corrente	Umidade
106417-02	60 s	249,2286 pA	0,40%
106417-03	60 s	219,2364 pA	0,40%
106417-05	60 s	284,3989 pA	0,70%
106417-06	60 s	271,9618 pA	0,40%
106419-01	60 s	1,5003 nA	2,80%
106419-02	60 s	207,0724 pA	0,50%
106419-05	60 s	324,123 pA	0,40%

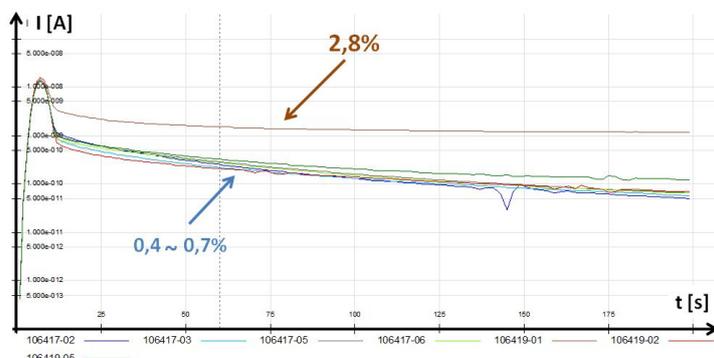


Fig. 9. Medidas de PDC no domínio do tempo.

A análise se repete agora no domínio do tempo. Pode-se observar que para a unidade identificada anteriormente o valor de corrente em 60s é maior do que o resultado médio das outras unidades, evidenciando um desempenho menor desse isolamento.

## Estudo de Caso – Avaliação de Buchas de Alta Tensão

Foram realizados ensaios em buchas ABB 230 KV tipo WTXF 245-1050/800. São apresentados os resultados dos testes realizados na capacitância principal C1. A figura 11 mostra as buchas testadas.

TABELA IV  
Valores de Placa para C1 em Buchas 230 KV sob Teste

Item	Bucha	Capacitância	Fator de Dissipação
1	125009	338 pF	0,393 %
2	531611	342 pF	0,324 %
3	717703	339 pF	0,346 %
4	125496	343 pF	0,345 %



Fig. 10. Buchas sob teste.

Neste trabalho são analisadas 4 buchas registradas na tabela 4. A figura 12 e a tabela 5 trazem os resultados dos testes realizados.

TABELA V  
RESULTADOS DOS TESTES NA FREQUÊNCIA DE 60 HZ

Item	Bucha	Freq.	Capacitância	Fator de Dissipação	Impedância
1	125009	60 Hz	331,493 pF	0,3870%	8,002 MΩ
2	531611	60 Hz	339,1667 pF	0,3380%	7,821 MΩ
3	717703	60 Hz	329,5395 pF	0,3810%	8,049 MΩ
4	125496	60 Hz	94,4429 nF	276,5880%	9,55 kΩ

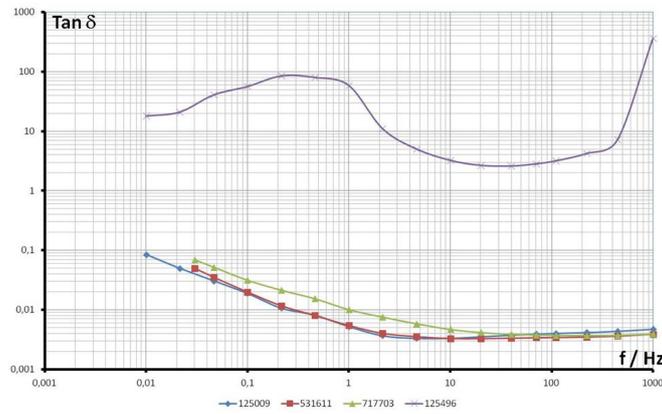


Fig. 11. Testes de FDS o domínio da frequência com os valores de fator de dissipação correspondentes às buchas da tabela 5.

Essas buchas fazem parte de um grupo reserva, exceto a bucha no 125496 (item 4). Seu histórico mostra que a mesma foi retirada de operação depois da constatação de superaquecimento e não conformidade no ensaio de perdas (fator de dissipação e capacitância). Este exemplo de aplicação do teste de espectroscopia mostra a diferença entre buchas boas e uma bucha falhada, com alto grau de degradação no isolamento. Além dos valores pontuais a 60Hz evidenciarem a falha, neste caso, a assinatura com a variação de frequência também o faz.

## Estudo de Caso – Avaliação de Transformador 230 KV Reserva

Foram realizados ensaios de FDS e PDC em um transformador WEG 230-69-13,8 KV, fabricado em 1981 e reformado em 2010. A tabela 6 mostra os resultados na frequência de 60 Hz extraídas do teste de PDC+FDS mostrada na figura 12. A figura 13 mostra a unidade testada. Os resultados apresentados mostram que o transformador encontra-se em bom estado.

**TABELA V**  
**Resultado de Teste em Transformador WEG 230KV (60Hz)**

Teste realizado	Fator de Dissipação	Capacitância	Umidade
AT – BT (CHL)	0,210 %	2,4681 nF	1,2 %
BT–massa (CLT)	0,226 %	4,6884 nF	1,3 %

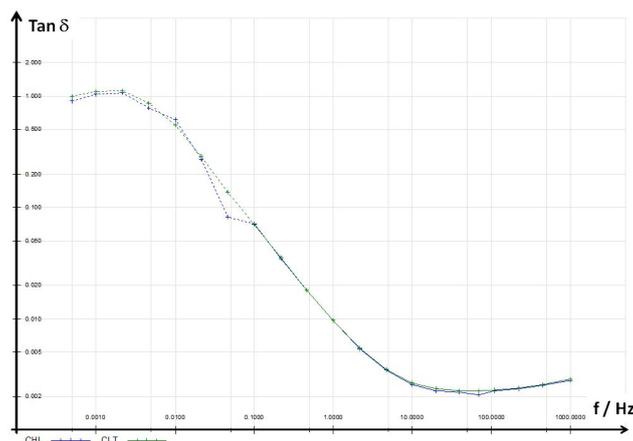


Fig. 12. Transformador 230-69-13.8 KV sob teste.



Fig. 13. Transformador 230-69-13.8 KV sob teste.

### 3. Conclusões

A análise e diagnóstico das condições de transformadores torna-se cada vez mais importante para garantir a disponibilidade das funções de distribuição e transmissão de energia elétrica. Este trabalho apresentou aplicações envolvendo novas tecnologias e novos equipamentos capazes de realizar testes com maior rapidez e eficácia.

Este artigo discutiu abordagens para medir a umidade e a degradação do isolamento em transformadores de potência identificando a resposta do dielétrico mediante a variação de frequência. Métodos de diagnósticos do dielétrico deduzem o teor de umidade no isolamento sólido de como correntes polarização e despolarização e fator de dissipação versus frequência.

Também mostrou procedimentos para identificação de problemas em equipamentos de alta tensão com a avaliação do isolamento identificando a resposta do dielétrico através da espectroscopia no domínio do tempo e no domínio da frequência, utilizando diagramas de equilíbrio. Com isto será possível detectar a degradação no isolamento em um estágio inicial, com uma análise mais detalhada.

### 4. Referências bibliográficas

Polymer Physics, Ulf W. Gedde, Kluwer , 1995.

Tuncer, E.; Serdyuk, Y.V.; Gubanski, S.M.: “Dielectric Mixtures: Electrical Properties and Modelling”, IEEE Trans. Dielectrics and El. Ins., Vol. 9 No. 5 ,Oct. 2002, pp

M. Koch, S. Tenbohlen: “The Breakdown Voltage of Insulation Oil under the Influence of Humidity, Acidity, Particles and Pressure”, International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM, 26.-28.09.2007, Wroclaw.

M. Koch, S. Tenbohlen, I. Hoehlein and J. Blennow: “Reliability and Improvements of Water Titration by the Karl Fischer Technique” Proceedings of the XVth International Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Ljubljana, Slovenia, 2007

L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter: “Aging of oil-impregnated paper in power transformers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2004 Volume: 19, Issue 1, p. 230- 239.

S. M. Gubanski, P. Boss, G. Csepes, V.D. Houhanessian, J. Filippini, P. Guinic, U. Gafvert, V. Karius,

J. Lapworth, G. Urbani, P. Werelius, W. S. Zaengl: “Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers” CIGRÉ Task Force D1.01.09, Technical Brochure 254, Paris, 2004

Myers, S. D., Kelly, J. J., Parrish, R. H. A guide to transformer maintenance. Ohio: Transformer Maintenance Institute. s. a. 830p.

H. Borsi, E. Gockenbach, M. Krueger “Method and Device for Measuring a Dielectric Response of an Electrical Insulation System” European Patent EP1729139

M. E. C. Paulino, M. Koch, M. Krueger, L. Giacchetta. “Diagnóstico em Campo para Determinação de Umidade em Transformadores” Proceedings of the 13th Encuentro Regional Ibero Americano do CIGRE, ERIAC, Puerto Iguazu, Argentina, 2009

M. E. C. Paulino, V. C. V. M. Beltrão. “Diagnóstico em Campo de Umidade no Isolamento de Transformadores de Potência e Buchas de Alta Tensão” Proceedings of the IEEE/PES 2010 T&D Latin America Conference, São Paulo, Brasil, 2010

U. Gafvert, G. Frimpong, and J. Fuhr: “Modelling of dielectric measurements on power transformers”, Proc. 37th Session “Large High Voltage Electric Systems” (CIGRE), paper 103, Paris, France, 1998.

DIRANA Application Guide “Measuring and Analyzing the Dielectric Response of Power Transformers”, February 2010

IEC 60422:2005, “Mineral Insulating Oil in Electrical Equipment – Supervision and Maintenance Guidance”, 3rd Ed

---