



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

BR/GTM/27
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – XIII

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

ESPECTROSCOPIA DO DIELÉTRICO NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO

**Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino (*)
Adimarco**

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 e buchas 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.

PALAVRAS-CHAVE

Espectroscopia, Subestação, Detecção de Defeitos, Testes e Ensaios

1.0 - INTRODUÇÃO

Aumenta-se a necessidade de buscar procedimentos, equipamentos e ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de alta tensão de forma rápida e precisa. Os profissionais envolvidos com as atividades de comissionamento, manutenção, diagnóstico e análise desses componentes dessas instalações 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 [1].

Atualmente foram desenvolvidos métodos para deduzir o conteúdo de umidade no isolamento óleo e papel a partir das propriedades do isolamento. Este artigo discute esses métodos com 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 [2]. O trabalho também mostra e analisa ensaios realizados em transformadores de potência, transformadores de instrumentos.

2.0 - ANÁLISE UTILIZANDO A 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

(*) Av das Américas, n° 500 – sala 212 - Bloco 10 – CEP 22.640-100 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 24947140 – Email: mecgpaulino@yahoo.com.br, marcelo@adimarco.com.br

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 desses. 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 $1,72 \times 10^{-8}$ [Ωm] a 20°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} [Ωm], 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 de dipolos é resultado do deslocamento da posição média de dipolos permanentes de tal modo que eles têm um momento dipolar elétrico, produzindo uma rotação que está relacionada com a frequência aplicada. Um exemplo de dipolo permanente é a molécula de água. 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 [3]. Tem-se ainda a polarização interfacial na superfície e nas fronteiras entre os elementos constituintes de um isolamento. Essas interfaces podem ser carregadas 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.).

3.0 - DETERMINAÇÃO DO ESTADO DO ISOLAMENTO EQUIPAMENTOS DE ALTA 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. 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 [4].

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.

4.0 - DIAGNÓSTICO DE UMIDADE NO ISOLAMENTO

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 [5].

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 [6]. 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.

4.1 Medidas das Propriedades Dielétricas

Sobre as propriedades do dielétrico, o isolamento de um transformador é composto de espaçamentos preenchidos com óleo isolante. Sendo aplicada tensão de teste no enrolamento de alta tensão, a corrente flui na isolação principal e é medida no instrumento de teste. Essa corrente é medida na ordem de [nA] e [pA]. As propriedades medidas são a condutividade da celulose e do óleo, além do efeito de polarização interfacial. A polarização interfacial ocorre se dois materiais com diferente condutividade e permissividade (óleo e papel) estão dentro de um dielétrico. Assim os íons em óleo viajam para o eletrodo oposto e forma uma nuvem de carga que pode ser medida externamente como um efeito de polarização. A polarização e a condutividade são afetadas pela geometria do isolamento e sua composição. A medida do isolamento de um transformador consiste na medida da superposição de vários efeitos, tais como as propriedades do papel sozinho e do óleo isolante, mostradas na figura 1.

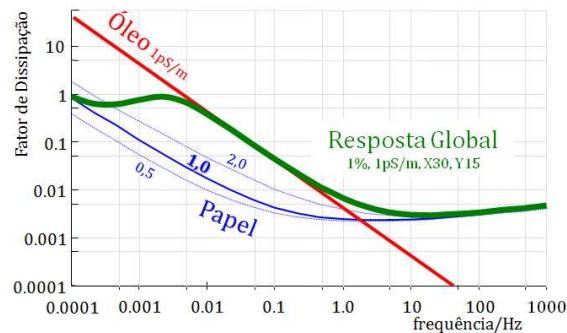


FIGURA 1 – Fator de Dissipação do Papel e do Óleo e a sobreposição dos efeitos na Resposta Global (óleo+papel)

A análise das propriedades dielétricas é dada com a combinação da polarização interfacial no isolamento óleo e papel no transformador de potência, combinando suas características. A resposta dielétrica de 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 tangente delta, com uma faixa de frequência maior, especialmente em baixas frequências. Este procedimento é chamado de Espectroscopia no Domínio da Frequência (*Frequency Domain Spectroscopy - FDS*). A combinação dessas duas técnicas reduz drasticamente a duração do teste comparado com as técnicas existentes [7].

4.2 Análise das Medidas no Isolamento e Determinação da Umidade

A umidade influencia fortemente grandezas como correntes de polarização e despolarização, capacitância e fator de dissipação. 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.

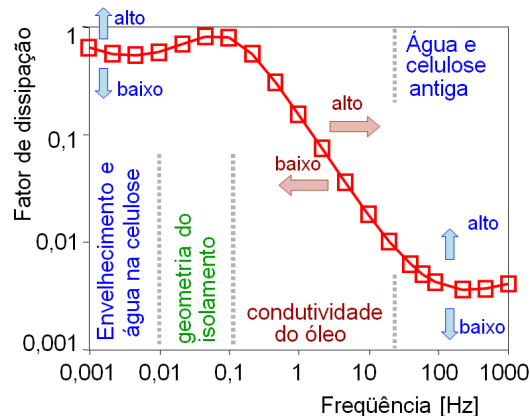


FIGURA 2 – Interpretação para os dados de domínio da frequência com a discriminação entre as influencias de vários fenômenos físicos.

A umidade influencia tanto em baixas quanto em altas frequências. A parte central da curva com o gradiente elevado 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.

A determinação da umidade é baseada em uma comparação da resposta do dielétrico do transformador com a resposta de um dielétrico padrão. Um algoritmo rearranja a resposta do dielétrico padrão e apresenta a condição do isolamento, fornecendo o grau de umidade e condutibilidade do óleo. Uma análise confiável da umidade em medidas realizadas em campo se baseia em uma grande quantidade de dados de respostas dielétricas padrão. A base de dados é formada por vários testes realizados com papel isolante novo a várias temperaturas, diferentes concentrações de umidade e óleo usados para impregnação [5].

As propriedades dielétricas do papel isolante envelhecido foram investigadas para possibilitar a análise da influência do tempo no isolamento [8]. No algoritmo de análise da umidade, inicialmente a temperatura do isolamento T , proveniente da resposta do dielétrico $C(f)$, é adquirida possibilitando a obtenção da permissibilidade $\epsilon_{PB}(f)$ através da extrapolação dos dados. O chamado modelo XY combina os valores da permissibilidade $\epsilon_{PB}(f)$ com a permissividade complexa do óleo $\epsilon_{oil}(f)$ permitindo assim o cálculo da resposta dielétrica de um isolamento linear [9] e multicamada onde o eixo X representa os valores relativos a barras no óleo e Y aos valores relativos aos espaçadores no óleo. O modelo obtido anteriormente $\epsilon_m(f) = \epsilon_{tot}(f)$ é convertido para um modelo capacitivo $C_m(f)$ e depois comparado com a resposta dielétrica $C(f)$. O modelo capacitivo $C_m(f)$ com o melhor tamanho para as capacitâncias medidas $C(f)$ mostra a umidade contida na celulose e a condutibilidade do óleo para transformadores reais.

5.0 - ESTUDO DE CASO – TESTE DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM OFICINA

Foram realizados ensaios em oficina para avaliação de transformadores de corrente. A figura 3 mostra um dos objetos testados e a figura 4 mostra os dados de placa do equipamento.



FIGURA 3 – Transformador de corrente em teste.



FIGURA 4 – Placa do Transformador em teste.

Na figura 5 são mostrados os resultados dos testes de FDS e PDC no domínio da frequência com os valores de fator de dissipação para os 3 transformadores de corrente testados. A tabela a seguir mostra os resultados na frequência de 60 Hz. Eles mostram características parecidas com diferentes níveis de umidade e condutividade do óleo, evidenciando que o isolamento em melhor estado é TC003.

Tabela 1 – Resultados: Teste em Transformador de Corrente

Unidade	Fator de Dissipação @ 60Hz	Capacitância @ 60Hz	Umidade	Condutividade
TC 001	0,5611%	677,2932 pF	2,6%	1,6 pS/m
TC 002	0,5143%	661,5935 pF	2,6%	3,3 pS/m
TC 003	0,4633%	665,3649 pF	2,0%	350 fS/m

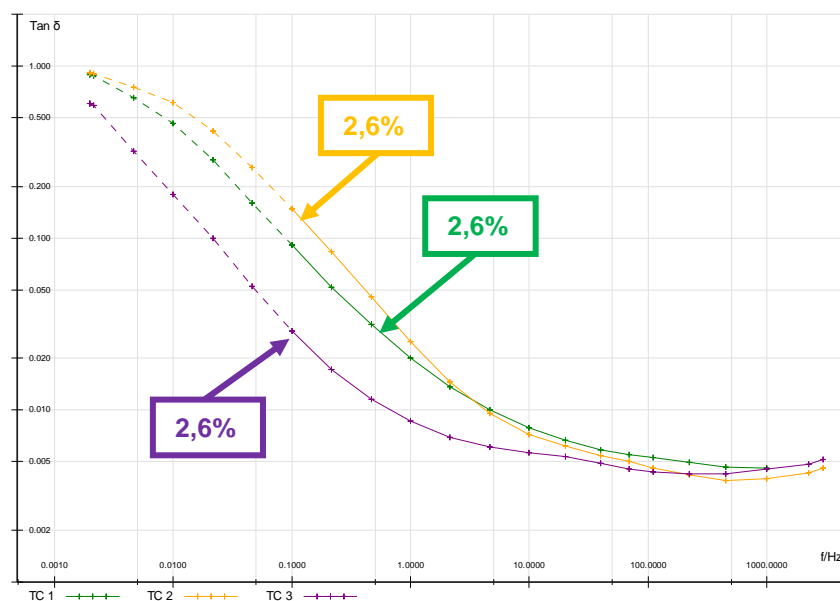


FIGURA 5 – Testes de FDS e PDC no domínio da frequência com os valores de fator de dissipação realizados em transformadores de corrente

6.0 - ESTUDO DE CASO – TESTE DE BUCHA EM OFICINA

Foram realizados ensaios em oficina fábrica para avaliação de bucha de transformador, modelo GOB-650, fabricante ASEA BROWN BOVERI. Os resultados das medidas de umidade no óleo são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados: Teste de Teor de H₂O no óleo

Data	27/11/2012	03/04/2013
Teor de H ₂ O (ppm) ASTM D1533	4	6

Na figura 6 é mostrado o resultado dos testes de FDS e PDC no domínio da frequência com os valores de fator de dissipação

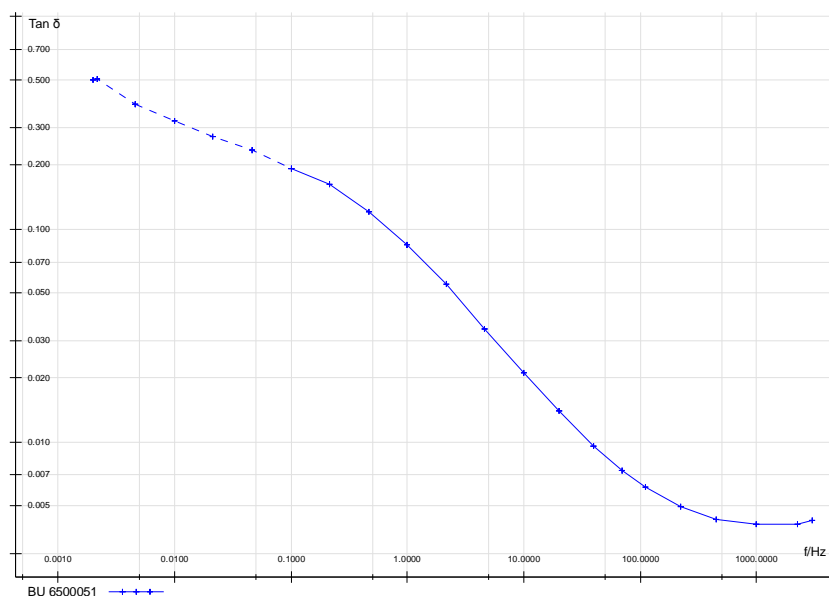


FIGURA 6 – Testes de FDS e PDC no domínio da frequência com os valores de fator de dissipação realizados em Bucha tipo GOB-650

A tabela 3 mostra os resultados do teste para a frequência de 60 Hz e a avaliação para temperatura de ensaio de 26°C.

Tabela 3 – Resultados: Teste em Bucha tipo GOB-650

Unidade	Fator de Dissipação @ 60Hz	Capacitância @ 60Hz	Umidade	Condutividade
BU 6500051	0,007898 %	222,5859 pF	1,8 %	59 pS/m

Para efeito de comparação com os resultados obtidos, foi realizada uma medida de fator de potência com outro dispositivo de teste e com baixa tensão (tensão de teste 1,0 kV). O resultado foi de Fator de Potência igual a 0,79% e 225,9 pF para Capacitância. Pode-se concluir que os resultados para 60 Hz foram muito próximos.

Vale ressaltar que os testes de Espectroscopia no Domínio da Frequência e Fato de Dissipação a 10 KV são testes diferentes, apesar dos resultados serem correlatos. Para correlacionar com o valor de Fator Dissipação medido no teste de Espectroscopia no Domínio da Frequência, foi realizado um ensaio com ponte de Fator de Potência com uma tensão menor, 1 KV. E isso mostrou que os resultados obtidos foram os mesmos.

7.0 - CONCLUSÃO

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. Também mostrou procedimentos para identificação de problemas em equipamentos de alta tensão com a 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.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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
- (2) S. M. Gubanski, et al.: "Dielectric Response Analysis for Transformers Windings" CIGRÉ Task Force D1.01.14, Technical Brochure 404, Paris, 2010
- (3) Polymer Physics, Ulf W. Gedde, Kluwer, 1995.
- (4) 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.
- (5) 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
- (6) S. M. Gubanski, P. Boss, G. Csepes, V.D. Houhanessian, J. Filippini, P. Guuinic, 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
- (7) H. Borsi, E. Gockenbach, M. Krueger "Method and Device for Measuring a Dielectric Response of an Electrical Insulation System" European Patent EP1729139
- (8) C. Ekanayake: "Diagnosis of Moisture in Transformer Insulation", Ph.D. dissertation, Dep. of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, 2006
- (9) U. Gafvert, G. Frimpong, and J. Fuhr: "Modelling of dielectric measurements on power transformers", Proc. 37th

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino é Engenheiro Eletricista e Especialista em Manutenção de Sistemas Elétricos pela na Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Gerente Técnico da Adimarco. Autor e coautor de mais de 90 trabalhos técnicos em eventos no Brasil e no exterior. Professor convidado do Curso de Especialização em Manutenção de Sistemas Elétrico e Curso de Especialização em Automação de Sistemas Elétricos da UNIFEI. É instrutor certificado pela OMICRON electronics. Membro ativo de sociedades profissionais nacionais e internacionais. Representante brasileiro nos WG B5.32 Functional testing of IEC61850 based systems e WG B5.06 Maintenance Strategies for Digital Substation Automation Systems. Membro do WG A2.44 Guide on Transformer Intelligent Condition Monitoring e GT A2.05 do Guia de Manutenção para Transformadores de Potência do Cigré. É Secretário da CE-03:057.01 - do COBEI/ABNT responsável pela nacionalização da Norma IEC 61850 e representante brasileiro na IEC no TC57.(mecpaulino@yahoo.com.br)