



GRUPO - XIII

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

ESTIMATIVA DA UMIDADE NA ISOLAÇÃO SÓLIDA A PARTIR DO ÓLEO ISOLANTE DE
TRANSFORMADORES

MARTINS, A.R. (*)
CELESC D

QUADROS, A.M.
ELETROSUL

MARTINS, A.D.C.P.
CEMIG D

SESSA, C.D.
CEMIG D

RESUMO

Neste trabalho foi avaliada a aplicabilidade dos diagramas de equilíbrio para estimar indiretamente a umidade na isolação celulósica. Apesar de existirem diversas curvas publicadas, muitos dados foram obtidos com a extrapolação e combinação de trabalhos de pesquisas dos materiais utilizados em determinada época.

Uma nova abordagem para melhorar os diagramas de equilíbrio foi utilizada por Koch [5], que adaptou os diagramas à capacidade de adsorção de água dos materiais envolvidos. Aplicando estes diagramas pode-se constatar que os limites de teor de água estabelecidos nas normas técnicas garantem que a condição da isolação celulósica será de no máximo “moderadamente úmida”.

PALAVRAS-CHAVE

Umidade, Saturação relativa, Diagramas de equilíbrio.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores são equipamentos importantes e de elevado valor agregado para o sistema elétrico de potência. A falha não esperada de um transformador pode causar interrupção no fornecimento de energia elétrica, gerando perda de confiabilidade e aumento dos custos operacionais das empresas, com reflexo negativo na reputação da concessionária de energia e possível penalização pelo órgão regulador.

No mercado atual, com aumento na demanda de energia, idade média elevada dos equipamentos e pressão com os custos de operação, a avaliação da condição de operação do transformador tem grande importância para as concessionárias, que são obrigadas a utilizar plenamente a capacidade e vida útil dos equipamentos.

A vida útil de um transformador é determinada pela degradação da isolação celulósica, desde que não haja outros fatores de projeto, construção e montagem, que por sua vez é influenciada, principalmente, pelos seguintes fatores: temperatura, oxigênio, umidade (água) e produtos de oxidação do óleo. [1]

A temperatura de operação do transformador está diretamente relacionada com o seu ciclo de carregamento, dependendo da característica intrínseca do equipamento e do seu modo operacional. Os demais parâmetros são monitorados preventivamente para minimizar sua influência na degradação das propriedades mecânicas do papel isolante.

Entre os fatores que favorecem o envelhecimento, a umidade presente na isolação do transformador tem importância preponderante sobre as demais, somado ao fato de que baixos teores de água são fundamentais para garantir a isolação adequada e, conseqüentemente, a operação segura e confiável do equipamento. [1]

A presença de água além dos limites admissíveis para sua classe de tensão causa três efeitos prejudiciais nos transformadores de potência: diminui a suportabilidade dielétrica, acelera o envelhecimento do papel isolante e, pode levar à formação de bolhas de gás. As principais fontes de contaminação por água são: a umidade residual do processo fabricação, a entrada do ar atmosférico durante a operação e, o envelhecimento do óleo e do papel isolante. [2]

No Brasil, as diretrizes para supervisão e manutenção do óleo mineral isolante de equipamentos elétricos estão publicadas na norma ABNT NBR 10576, a qual define valores de referência de umidade para início de controle em equipamentos novos, bem como, os valores limites para a tomada de ação corretiva.

A determinação da umidade real da isolação sólida é somente possível com a retirada de amostras durante o reparo do equipamento e posterior análise coulométrica Karl Fischer, mas muitos cuidados precisam ser tomados para que esta amostra seja representativa do teor de umidade do papel no transformador quando em operação.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de verificar a aplicabilidade dos diagramas de equilíbrio para estimar indiretamente a umidade na isolação celulósica.

2.0 - AVALIAÇÃO INDIRETA DA UMIDADE NA CELULOSE

2.1 Diagrama de equilíbrio convencional

O sistema óleo/papel nos transformadores apresenta variação de umidade que depende da temperatura de operação. Pequenas variações na temperatura alteram significativamente o teor de umidade do óleo, porém apenas ligeiramente o teor de umidade do papel.

Existem muitas publicações de curvas de equilíbrio para água em óleo e no papel. A primeira foi reportada por Fabre e Pichon [3] em 1960, que obtiveram as curvas utilizando medições diretas do teor de água (por Karl Fischer) no óleo e no papel.

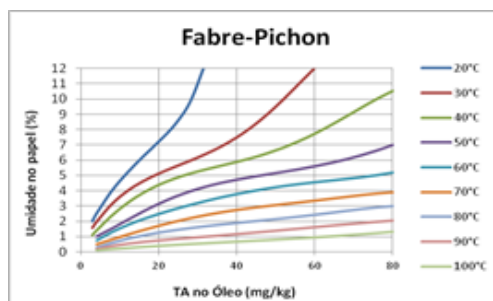


FIGURA 1 – Diagrama de equilíbrio de Fabre-Pichon

Outro conjunto conhecido de curvas foi publicado por Oommen em 1984 [4], baseado no princípio que a umidade relativa é a mesma nos materiais em contato (óleo, celulose e ar) à mesma temperatura, após um tempo suficiente para se atingir o equilíbrio.

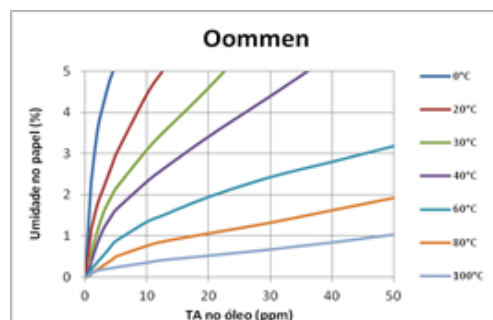


FIGURA 2 – Diagrama de equilíbrio de Oommen

O procedimento padrão utilizado nesta abordagem, consiste em: 1. amostrar o óleo nas condições de serviço; 2. medir o teor de água do óleo por Karl Fischer e, 3. estimar o teor de umidade do papel através do diagrama de curvas de equilíbrio.

Apesar de existirem diversos conjuntos de curvas publicadas, muitos dados foram obtidos com a extrapolação e combinação de trabalhos de pesquisas dos materiais utilizados na época. Outro fator importante que não foi considerado é o envelhecimento do óleo. Assim, estas curvas de equilíbrio apresentam desvantagens: apenas um número pequeno de medições reais; não consideram os materiais isolantes utilizados a partir da década de noventa ; e subestimam o envelhecimento [5].

2.2 Diagrama de equilíbrio aperfeiçoado

Uma nova abordagem para melhorar os diagramas de equilíbrio foi utilizada por Koch, que adaptou os diagramas à capacidade de adsorção de água dos materiais envolvidos.

Para medir a umidade na celulose e no óleo e, construir os diagramas de equilíbrio [5] foi utilizado o método indireto, baseado na lei da física que afirma que a saturação relativa (RS) de materiais adjacentes é igual em condições de equilíbrio.

$$RS_{\text{óleo}} = RS_{\text{celulose}} = RH_{\text{ar}} \quad (1)$$

A figura 3a ilustra a solubilidade da água em óleo novo no estudo da referência [5] em várias temperaturas, com os dados calculados pela equação empírica 2:

$$W_s = A \cdot e^{-B/T} \quad (2)$$

Onde:

W_s : Solubilidade de saturação da água em óleo (ppm)

A: $8,76 \cdot 10^6$

B: 3504

T: Temperatura (K)

As isotermas para os materiais celulósicos foram obtidas na faixa de temperatura e umidade habitual para os transformadores (20 °C à 80 °C / 0,4 % à 6,0 %). Os materiais celulósicos foram colocados em frascos de polietileno onde sensores capacitivos mediram a umidade relativa do ar até atingir o equilíbrio. Em seguida, determinou-se a umidade em peso do papel por titulação coulométrica Karl Fischer. Na figura 3b, são apresentadas as isotermas de umidade para papel kraft novo.

Então, as isotermas de umidade dos materiais celulósicos e dos óleos foram combinadas igualando o eixo das abscissas (saturação relativa).

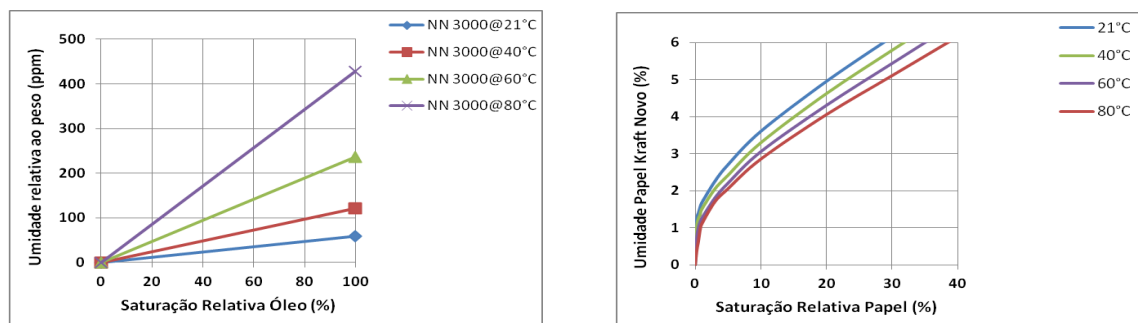


FIGURA 3a /3b – Ilustração do método indireto para criar os diagramas de equilíbrio [5]

Este método apresenta vantagens, pois o equilíbrio da celulose livre de óleo é estabelecido muito rapidamente em comparação com a celulose imersa em óleo. Além disso, o perfil do diagrama é mais homogêneo e, a medição da saturação relativa da umidade é facilitada e contínua. Utilizando esta abordagem muitas combinações de isotermas são possíveis. A figura 4 ilustra o diagrama de equilíbrio para óleo mineral novo e papel kraft novo.

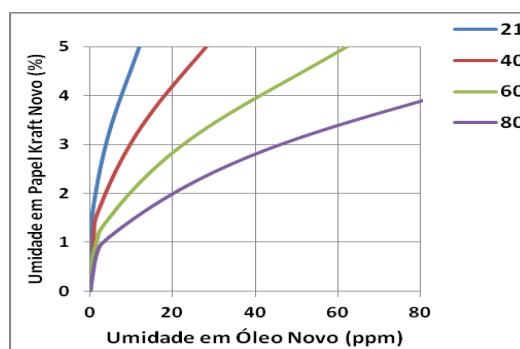


FIGURA 4 – Exemplo de Diagramas de equilíbrio para Óleo Mineral Novo com Papel Kraft Novo [5]

Utilizando os diagramas de equilíbrio aperfeiçoados, há um ganho na qualidade dos resultados, pois foram adaptados à capacidade de absorção de umidade dos materiais com medições reais, de materiais utilizados atualmente e de materiais envelhecidos.

2.3 Equilíbrio termodinâmico

Sistemas termodinâmicos tendem a atingir o equilíbrio, porque este é o estado com maior entropia. Um sistema está em equilíbrio termodinâmico quando suas propriedades não mudam.

Em um transformador de potência, o equilíbrio termodinâmico global dificilmente será alcançado devido às variações no carregamento, às variações da temperatura ambiente, aos gradientes de temperatura dentro de um transformador e, as constantes de tempo para difusão da umidade na isolamento celulósica [6].

A modelagem térmica da figura 5 mostra os possíveis gradientes de temperatura em um transformador (com elevação de 65°C) em operação, com carga plena e condições ambientais constantes [7].

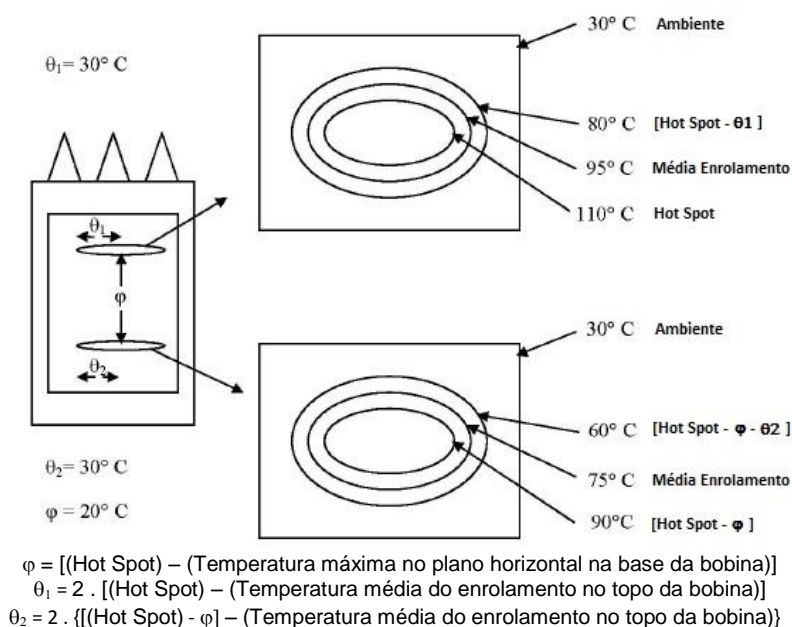


FIGURA 5 – Modelagem térmica para um transformador com elevação 65°C (com carga plena e condições ambientais constantes)

Este modelo indica que, para transformadores em operação, a previsão de um único valor homogêneo de umidade no papel é inválida.

2.4 Estimativa da condição da isolamento celulósica

Os diagramas de equilíbrio estimam faixas de valores de umidade, devido aos gradientes de temperatura, nos transformadores em operação.

Atualmente, há divergência entre as normas internacionais da IEC [8] e da IEEE [9] quanto à utilização dos diagramas de equilíbrio para determinar o nível de secagem do isolamento celulósico dos transformadores em operação.

A IEEE de 2006 [6] reporta a falta de equilíbrio termodinâmico em um transformador em operação, concluindo que uma correlação quantitativa não é possível.

A IEEE vigente [9], publicada em 2015, não faz menção aos diagramas de equilíbrio de saturação relativa em função da umidade no papel e sugere o uso da correlação da saturação relativa da água no óleo com a rigidez dielétrica, visando garantir as condições adequadas para a operação.

Para a IEC [8], os diagramas de equilíbrio podem ser utilizados como ferramenta para análise de tendência através do percentual de saturação da água em óleo, desde que as seguintes condições sejam satisfeitas: 1. Existe equilíbrio entre óleo e papel; 2. Não há entrada anormal de umidade (vazamentos); 3. Presença de papel no equipamento; 4. Ausência de água livre. A tabela 1 é apresentada como um guia informativo.

Tabela 1: Orientação para interpretação dos dados expressos em percentagem de saturação [8]

Percentagem de saturação de água no óleo (%)	Condição da isolamento celulósica
< 5	Seca
> 5 < 20	Moderadamente úmida
20 a 30	Úmida
> 30	Extremamente úmida

Nota: Esta mesma tabela existia na IEEE C57.106/2002 [10], mas na atual versão foi removida.

Ao analisar os diagramas de equilíbrio aperfeiçoados por Koch [5], considerando a modelagem térmica da figura 5, verificamos certa correlação na estimativa da umidade do papel com os valores da norma IEEE Std 62 [11] inativa e, substituída pela IEEE C57.152 em 2013 [7]).

Tabela 2 – Teor de umidade no papel segundo IEEE Std62/1995

Condição da isolamento	Teor de Umidade
Seca	0 - 2%
Úmida	2 - 4%
Muito Úmida	+ de 4,5%

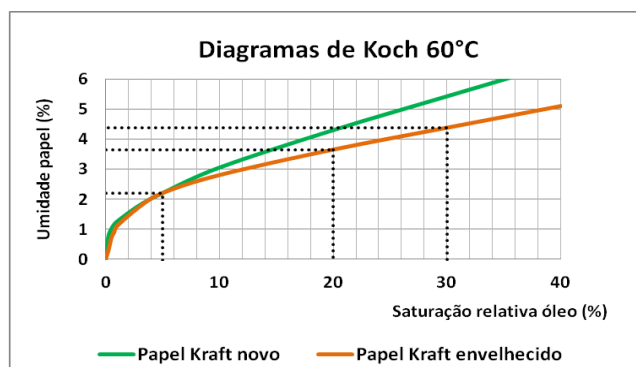


FIGURA 6 – Diagramas de equilíbrio de Koch PKN/PKE à 60°C [5]

Nesta abordagem, os limites de saturação da tabela 1 são uniformizados para os transformadores, ou seja, não há aderência com a filosofia vigente dos valores de umidade em óleo especificados por classe de tensão.

2.5 Percentual de saturação em função dos limites normalizados por classe de tensão

A Tabela 3 mostra os valores de referência recomendados pela IEC 60422 [8] para umidade em óleos minerais isolantes novos e em serviço por classe de tensão, determinados por análise coulométrica Karl Fischer.

Tabela 3 – Limites estabelecidos na norma IEC 60422 para o teor de água [8]

Condição do Óleo Isolante		Teor Água (mg/kg)		
		$\leq 72,5$	$> 72,5 < 170$	≥ 170
Novo (após enchimento)		20	<10	<10
Em serviço	Bom	< 30	< 20	< 15
	Regular	30 - 40	20 - 30	15 - 20
	Ruim	> 40	> 30	> 20

A equação 3 abaixo relaciona o percentual de saturação relativa da água no óleo, a temperatura e o teor de água dissolvido no óleo, em ppm. Os parâmetros A e B são coeficientes determinados experimentalmente para óleo novo, onde: A = 7,0895 e B = 1567 [8].

$$Saturação\ Relativa(\%) = \frac{Teor\ de\ água_{\text{óleo}}(ppm)}{10^{\frac{A - (\frac{B}{273,16 + T(^{\circ}C)})}{B}}} \quad (3)$$

A figura 7 foi construída calculando a saturação relativa em função da temperatura para os limites absolutos do teor de água no óleo (bom / em serviço) por classe de tensão da IEC. Quando a temperatura aumenta, o limite de saturação aumenta, resultando em um menor percentual de saturação relativa. Por outro lado, quando a temperatura diminui, o percentual de saturação relativa aumenta.

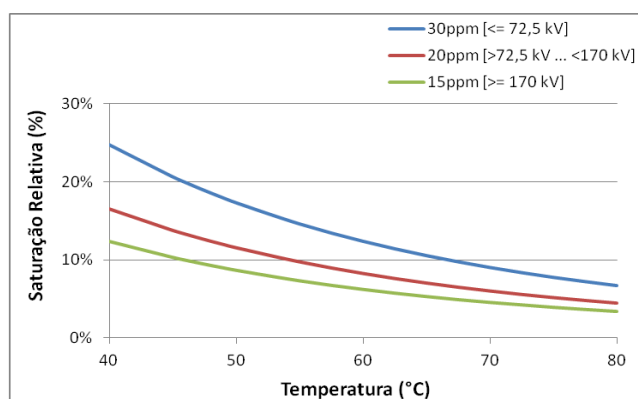


FIGURA 7 – Curvas de saturação relativa (%) em função da temperatura para os limites de teor de água no óleo, em ppm, para as diferentes classes de tensão

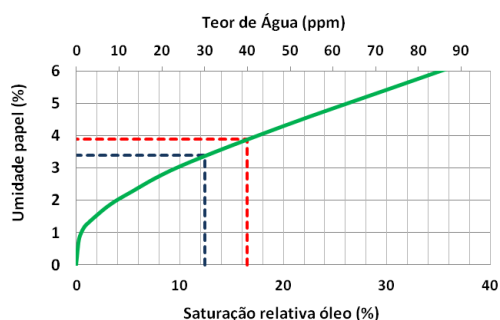
Aplicando-se a equação 3 aos valores limites estabelecidos na IEC 60422 (tabela 3) para a temperatura de 60 °C, obtém-se as respectivas saturações relativas apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Limites do teor de água (ppm) e os respectivos percentuais de saturação relativa à 60 °C

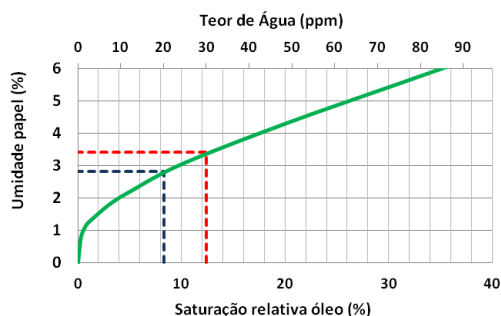
Classe de tensão (kV)					
<= 72,5		> 72,5 < 170		>= 170	
Teor Água (ppm)	Saturação relativa (%)	Teor Água (ppm)	Saturação relativa (%)	Teor Água (ppm)	Saturação relativa (%)
30	12,4	20	8,3	15	6,2
40	16,5	30	12,4	20	8,3

A figura 8 apresenta os resultados obtidos utilizando-se os diagramas de Koch, à temperatura de 60 °C, mostrando o percentual de saturação relativa do óleo em função do percentual de umidade no papel, onde se verifica que os limites estabelecidos na norma IEC 60422 garantem que a condição da isolamento celulósica será de no máximo “moderadamente úmida”, de acordo com o critério apresentado na Tabela 1. Pode-se observar também, que para as classes de tensão mais elevadas os valores limites são mais conservadores, assegurando baixo percentual de umidade na isolamento celulósica.

<=72,5 kV



>72,5 kV <170 kV



>170 kV

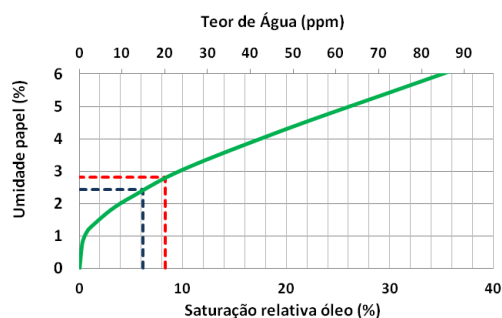


FIGURA 8 – Diagramas de equilíbrio aperfeiçoados de Koch para papel kraft novo por classe de tensão à 60°C

2.6 Análise de tendência da umidade

2.6.1 Normalização do teor de água a 20 °C

Para interpretação mais precisa do teor de umidade, os resultados do teor de água no óleo podem ser corrigidos em função da temperatura de amostragem.

Assim a temperatura é ajustada para 20 °C, utilizando-se a equação de correção 4 [8]:

$$f = 2,24e^{(-0,04ts)} \quad (4)$$

Onde,

f é o fator de correção;

e número irracional (logaritmos neperianos), 2,7183;

t_s é a temperatura da amostra de óleo, no momento da coleta, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Um exemplo da normalização do teor de água a 20°C é apresentado na Figura 9.

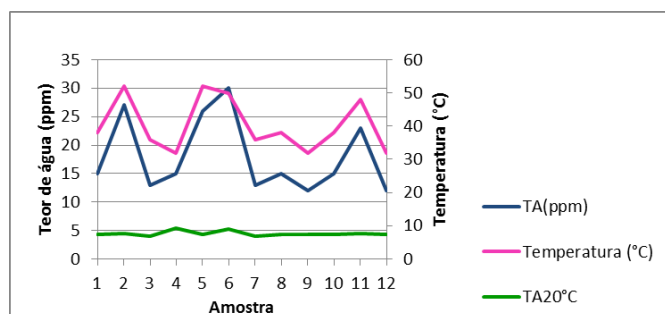


FIGURA 9 – Normalização do teor de água a 20°C

2.6.2 Saturação relativa

A saturação relativa (W_{REL}) é definida pela relação entre o teor de água absoluto a uma determinada temperatura e a solubilidade de água em óleo na mesma temperatura (W_{ABS}/W_S). O resultado é dado em porcentagem e, é útil para avaliação de tendência [8].

A saturação pode ser calculada a partir dos valores obtidos por titulação Karl Fischer conforme ABNT NBR 10710 [12] ou por sensores de umidade *online*.

O teor de água em óleo é diretamente proporcional à concentração de água relativa (saturação relativa) até o nível de saturação. A solubilidade de água em óleo (W_S) é dependente da temperatura e é expressa pela equação 2.

Um exemplo de avaliação pela saturação relativa é apresentado na Figura 10.

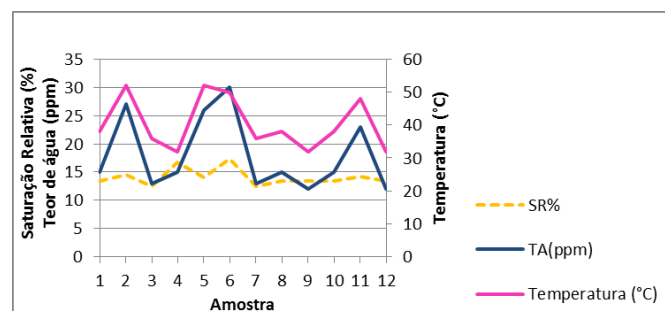


FIGURA 10 – Saturação relativa em função das amostras

Nas Figuras 9 e 10, as correções aplicadas permitem que amostras de um mesmo transformador, em diferentes condições de carga e/ou temperatura ambiente tenham os efeitos da variação de temperatura nos resultados de determinação do teor de água minimizados.

3.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora tenha ocorrido uma melhora significativa na qualidade dos diagramas de equilíbrio (convencionais / aperfeiçoados), para um transformador em operação, não é possível estimar o valor da umidade no papel isolante.

A avaliação da condição da isolamento celulósica a partir dos limites de saturação relativa percentual de água no óleo é simplista, considera todos os transformadores iguais, sem distinção por classe de tensão.

Os limites de teor de água estabelecidos nas normas técnicas [8,13] permitem afirmar que a condição da isolamento celulósica será de no máximo “moderadamente úmida”, ou seja, a saturação relativa da água no óleo sempre estará abaixo de 20 %, de acordo com o critério apresentado na Tabela 1.

Ressalta-se a importância dos limites absolutos do teor de água recomendados pelas normas técnicas [8,13] para os transformadores novos, conforme apresentado na Tabela 3.

Os diagramas de equilíbrio podem ser utilizados para análise de tendência da umidade como ferramenta importante para a Engenharia de Manutenção determinar ações corretivas, visando garantir as condições operacionais adequadas e a extensão da vida útil dos transformadores.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIGRE Technical Brochure 323, 2007 – Ageing of Cellulose in Mineral Oil Insulated Transformers
- [2] CIGRE Technical Brochure 349, 2008 – Moisture equilibrium and moisture migration within Transformer insulation systems
- [3] J. Fabre, A. Pichon: “Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers” *International Conference on Large High Voltage Electric Systems CIGRÉ*, Paper 137, Paris, France, 1960
- [4] T. V. Oommen: “Moisture Equilibrium Charts for Transformer Insulation Drying Practice” *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 10, Oct. 1984, pp.3063-3067
- [5] M. Koch: “Reliable Moisture Determination in Power Transformers”, *Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart* – 2008
- [6] IEEE C57.106/2006 - Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment
- [7] IEEE C57.152/2013 - Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors
- [8] IEC 60.422/2013 – Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance
- [9] IEEE C57.106/2015 - Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment
- [10] IEEE C57.106/2002 - Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment
- [11] IEEE Std 62/1995 - Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors
- [12] ABNT NBR 10710 – Líquido isolante elétrico – Determinação do teor de água
- [13] ABNT NBR 10576 – Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos – Diretrizes para supervisão e manutenção

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alexandre Rios Martins, graduado em Química/Bacharelado pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Especialização em Engenharia de Materiais para o Setor Elétrico pela Universidade Federal do Paraná – UFPR e, Especialização em Metrologia Científica e Industrial pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Atua há 23 anos como responsável técnico do Laboratório Físico-Químico da CELESC Distribuição.



Alzete Martins Quadros, graduada em Química/ Bacharelado pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, na área de Materiais Poliméricos pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. É funcionária da Eletrobrás/ELETROSUL Centrais Elétricas S.A., desde 1989, onde, atualmente, desenvolve atividades na área de Engenharia de Manutenção de equipamentos elétricos de alta e extra-alta tensão.



Adriana de Castro Passos Martins nascida em Belo Horizonte, graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, M.Sc. em Engenharia Metalúrgica e Materiais pela UFMG, com Especialização em Engenharia de Materiais para o Setor Elétrico pela UFPR. Atua como Engenheira de Planejamento e Manutenção da Geração e da Transmissão da CEMIG, coordenando o Centro de Monitoramento Preditivo.



Costabile DI Sessa, graduado em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo. Compõe o corpo de empregados da CEMIG GT desde 2006 onde atualmente desempenha a função de Engenheiro de Planejamento da Manutenção de Geração e Transmissão. Na CEMIG desenvolve principalmente trabalhos ligados a diagnósticos da condição operativa de equipamentos do Sistema Elétrico, suporte técnico em assuntos relacionados a isolantes gasosos e PCB. É membro do CIGRE desde 2012.