

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE EXTRA-
ALTA TENSÃO ISOLADOS A PAPEL E ÓLEO**

FLAVIO EDUARDO SPRESSOLA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

ORIENTADOR: PROF. MANUEL LUÍS B. MARTINEZ, DR.

ITAJUBÁ, JANEIRO DE 2011.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

S768a

Spessola, Flávio Eduardo

Avaliação do comportamento térmico de transformadores de corrente de extra-alta tensão isolados a papel e óleo / Flávio Eduardo Spessola. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2011.

86 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Transformadores de corrente. 2. Perdas dielétricas. 3. Desempenho térmico. 4. Ensaios. I. Martinez, Manuel Luís Barreira, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

*“AS MÃOS PREGUIÇOSAS EMPOBRECEM O HOMEM, PORÉM AS MÃOS DILIGENTES LHE TRAZEM RIQUEZA.
A ALMA QUE ABENÇO A PROSPERARÁ, E O QUE REGA TAMBÉM SERÁ REGADO.”*

PROVÉRBIOS DE SALOMÃO 10:4 E 11:25

*Dedico este trabalho ao meu Deus, à minha esposa Raquel
e a meus filhos Isabela e Lucas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, motivo maior de minha vida, cuja presença eu encontro em tudo o que faço.

Agradeço imensamente à minha esposa, companheira fiel em meus caminhos, parceira em minhas realizações.

Aos meus filhos, herança bendita e motivo de meus melhores sorrisos.

A meus pais, Luiz e Darlene, pelos valores do trabalho, da persistência e da fé.

Às minhas irmãs Vânia e Marília e ao meu cunhado Roberto, pelo incentivo e carinho.

Agradeço ao meu amigo e orientador, Prof. Martinez, pelo incentivo, amizade, confiança e por investir em mim desde os tempos de iniciação científica.

Ao amigo e gestor, Eng. Lauro Costa, incentivador constante de meus trabalhos e projetos.

Agradeço à empresa Alstom Itajubá na pessoa de seu diretor geral, Eng. André Gesualdi pelas oportunidades de aprendizado e formação.

Aos colegas da equipe de P&D na pessoa de seu gestor, Eng. Rodrigo Coelho, pela amizade e pelas ricas discussões técnicas.

Aos colegas dos laboratórios de ensaios elétricos da Alstom Itajubá, por seu trabalho, respeito e amizade.

Aos colegas do LAT UNIFEI pela grande ajuda que me deram na preparação da apresentação da defesa.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado e concluído.

RESUMO

O comportamento térmico de um transformador de corrente convencional de extra-alta tensão é função das perdas ôhmicas, perdas originadas nos núcleos magnéticos e perdas dielétricas. As perdas ôhmicas dependem das resistências dos enrolamentos e aumentam com o quadrado da corrente circulante. As perdas nos núcleos magnéticos são pouco representativas sob condições normais de operação. As perdas dielétricas são resultantes da circulação de corrente através do isolamento e dependem da qualidade e tensão aplicada ao mesmo, sendo, portanto não avaliadas pelos ensaios tradicionais de elevação de temperatura. Uma vez que as perdas dielétricas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada, sua influência torna-se mais significativa para equipamentos de tensões mais elevadas. Além das perdas dielétricas mais elevadas, transformadores de corrente de extra-alta tensão também são caracterizados por maiores espessuras de isolamento papel-óleo e conseqüentemente valores mais elevados de constante de tempo térmica. Os métodos existentes nas normas ora vigentes não levam em consideração tais fatores. Este trabalho discute os métodos de ensaio aplicáveis além de apresentar resultados práticos os quais demonstram a influência das perdas dielétricas na elevação de temperatura, bem como, sua relevância para a avaliação do desempenho térmico de transformadores de corrente de extra-alta tensão. Demonstra-se através de resultados práticos a necessidade de revisão dos métodos normalizados para o ensaio de elevação de temperatura e dos critérios para determinar-se a estabilização da temperatura.

ABSTRACT

The thermal behavior of a conventional current transformer for extra-high voltage is function of ohmic, dielectric and magnetic losses. The losses depend on the ohmic resistance of the windings and it increases with the square of the applied current. Losses from magnetic cores are negligible under normal operation. The dielectric losses are the result of current flow through the insulation and depend on its quality and applied voltage. These losses are not present during traditional temperature rise tests. Since the dielectric losses are proportional to the square of the applied voltage, its influence becomes more significant for higher voltage equipments. In addition to the higher dielectric losses, current transformers for extra-high voltage are also characterized by greater thicknesses of paper-oil insulation and hence higher values of thermal time constant. Current testing methods in the main standards do not consider these aspects. This paper discusses the test methods and presents practical results which demonstrate the influence of dielectric losses on temperature rise, as well as its relevance for assessing thermal performance of current transformers for extra-high voltage. It is demonstrated by practical results the need for revision of standardized methods for temperature rise tests and the criteria to determine the temperature stabilization.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2.....	4
CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO.....	4
2.1 – INTRODUÇÃO.....	4
2.2 – CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO.....	4
2.2.1 – CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES DOS MEIOS DIELÉTRICOS.....	4
2.2.1.1 - PROPRIEDADES DOS MEIOS DIELÉTRICOS.....	4
2.2.1.1.1 – CONDUTIVIDADE CC.....	5
2.2.1.1.2 – POLARIZAÇÃO.....	5
2.2.1.1.3 – PERMISSIVIDADE DIELÉTRICA.....	5
2.2.1.1.4 – PERMISSIVIDADE COMPLEXA, ÂNGULO DE PERDAS E FATOR DE DISSIPACÃO.....	6
2.2.1.1.5 – RIGIDEZ DIELÉTRICA.....	7
2.2.1.1.6 – OUTRAS CARACTERÍSTICAS.....	8
2.2.1.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DIELÉTRICOS.....	8
2.2.2 – SISTEMAS DIELÉTRICOS PAPEL-ÓLEO.....	8
2.2.2.1 – ÓLEOS ISOLANTES.....	9
2.2.2.1.1 – CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	11
2.2.2.1.2 – ESTABILIDADE QUÍMICA SOB SOLICITAÇÕES ELÉTRICAS E TÉRMICAS E PROPRIEDADES DIELÉTRICAS.....	13
2.2.2.1.2 – O ÓLEO ISOLANTE COMO PORTADOR DE INFORMAÇÕES.....	15
2.2.2.2 – PAPÉIS ISOLANTES.....	16
2.2.2.3 – SISTEMAS DE PAPEL IMPREGNADO COM ÓLEO.....	18
2.2.2.3.1 – O USO DE SISTEMAS DE PAPEL IMPREGNADO COM ÓLEO EM TRANSFORMADORES.....	20
2.3 – INFLUÊNCIA DA UMIDADE NA PERFORMANCE DOS DIELÉTRICOS PAPEL-ÓLEO.....	20
2.3.1 – ABSORÇÃO, ADSORÇÃO E MOLHABILIDADE.....	21

2.3.2 – FORMAS E TIPOS DE LIGAÇÕES ENTRE UMIDADE E DIELETRICOS.....	22
2.3.3 – DIFUSÃO DE UMIDADE E PERMEABILIDADE	23
2.3.4 – A UMIDADE NO ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO	25
2.3.5 – INFLUÊNCIAS DA UMIDADE NAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS, FÍSICO-MECÂNICAS E QUÍMICAS DOS MATERIAIS ISOLANTES	27
2.4 – ENVELHECIMENTO DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO.....	29
2.4.1 – A DEGRADAÇÃO DO ÓLEO MINERAL ISOLANTE	30
2.4.2 – A DEGRADAÇÃO DO PAPEL ISOLANTE	31
<i>CAPÍTULO 3.....</i>	<i>36</i>
<i>O ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO APLICADO A TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO.....</i>	<i>36</i>
3.1 – INTRODUÇÃO	36
3.2 – CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA O ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO DE TC DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO	36
3.3 – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE TC DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO	37
3.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL PARA O ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO DE TC DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO.....	39
3.5 – CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE SECAGEM DO PAPEL, TRATAMENTO DE ÓLEO E IMPREGNAÇÃO	41
3.6 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIDADE TÉRMICA DO ISOLAMENTO DE UM TC DE ALTA OU EXTRA-ALTA TENSÃO ISOLADO A PAPEL-ÓLEO	45
3.6.1 – O USO DO COEFICIENTE DE TEMPERATURA PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO ISOLAMENTO.....	48
3.6.2 –TENSÃO CRÍTICA DE RUPTURA TÉRMICA DO ISOLAMENTO.....	50
<i>CAPÍTULO 4.....</i>	<i>54</i>
<i>MÉTODOS DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE</i>	<i>54</i>
4.1 – ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA	55
4.1.1 – ASPECTOS PARTICULARES DAS NORMAS IEC	56
4.1.2 – ASPECTOS PARTICULARES DAS NORMAS IEEE	57
4.1.3 – ASPECTOS PARTICULARES DAS NORMAS ABNT	59
4.2 – MEDIÇÃO DO FATOR DE PERDAS DIELETRICAS DO ISOLAMENTO	60
4.3 – ENSAIO DE ESTABILIDADE TÉRMICA	60
4.4 – ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TANGENTE DE DELTA	61
4.5 – DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE TEMPO TÉRMICA DE UM TC	62

<i>CAPÍTULO 5</i>	64
<i>RESULTADOS E AVALIAÇÃO DE ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO</i>	64
5.1 – ENSAIOS ESPECIAIS DE ESTABILIDADE TÉRMICA PARA AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS PERDAS DIELÉTRICAS NA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA TOTAL DO TC	64
5.2 – ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TANGENTE DE DELTA.....	70
5.3 – ENSAIO DE ESTABILIDADE TÉRMICA REALIZADO COM FATOR TÉRMICO MAJORADO	71
5.4 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIOS	72
5.4.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURAÇÃO DOS ENSAIOS	72
5.4.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE DE REFERÊNCIA.....	74
5.4.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A INFLUÊNCIA DAS PERDAS DIELÉTRICAS NA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA TOTAL DO TC	76
5.4.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DO TC PARA DIFERENTES PERCENTUAIS DA CORRENTE NOMINAL.....	80
<i>CAPÍTULO 6</i>	81
<i>CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS</i>	81
6.1 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	84
<i>ARTIGO PUBLICADO</i>	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um sistema isolante por um capacitor em paralelo com um resistor

Figura 2 - Representação fasorial da corrente que circula através de um meio isolante e de suas componentes resistiva e capacitiva

Figura 3 - Relação entre Viscosidade e Temperatura para um óleo mineral isolante de base naftênica [9]

Figura 4 - Relação entre a umidade relativa do óleo e a umidade no papel para cada temperatura de operação

Figura 5 - Efeito da umidade na tangente de delta do papel impregnado com óleo [2]

Figura 6 - Vida útil de um transformador em condições ideais (A), em condições reais (B) e em condições reais, porém com teor de água no papel inicial de 2% (C). Variação do grau de polimerização com o tempo de operação. [11]

Figura 7 - Sobreposição de camadas de papel para evitar canais de óleo no isolamento papel-óleo de TC

Figura 8 - TC com isolamento em cascata [17]

Figura 9 - Configuração para distribuição de potencial ao longo do isolamento com uso de eletrodos toroidais [17].

Figura 10 - Configuração para distribuição de potencial ao longo do isolamento utilizando maior número de telas, sem uso de eletrodos toroidais [17].

Figura 11 - Configurações com e sem eletrodo toroidal para TC tipo invertido [17]

Figura 12 - Secagem de papel: Teor de água em equilíbrio versus temperatura e vácuo [17]

Figura 13 - Tangente de Delta a 90°C em função do teor de água para papel não impregnado [17]

Figura 14 - Tensão de Ruptura versus Teor de água no papel impregnado [17]

Figura 15 - Dependência da temperatura para a tangente de delta de um TC de 420 kV tipo invertido. [17]

Figura 16 - Dependência da tensão para a tangente de delta de um TC de 420 kV tipo invertido. [17]

Figura 17 - Relação entre $\text{tg}\delta$ e Temperatura do Isolamento de TCs [17]

Figura 18 - Distribuição de Gumbel para o coeficiente α de 40 TCs com elevado teor de água no isolamento [17]

Figura 19 - Representação do Isolamento Sólido entre Primário e Secundário de um TC [1]

Figura 20 - Determinação da Constante K a partir dos valores de F e ρ [1].

Figura 21 - Determinação da Constante σ a partir dos valores de F e ρ [1.]

Figura 22 – Curva “Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio” e Determinação da constante de tempo térmica de um TC

Figura 23 - Circuito de Ensaio – Estabilidade Térmica

Figura 24 - Arranjo para conexão entre terminais primários

Figura 25 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 800 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica

Figura 26 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 245 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica

Figura 27 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 145 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica

Figura 28 - Variação da Tangente de Delta com a Temperatura

Figura 29 - Variação da Tangente de Delta com a Tensão para o TC de 800 kV

Figura 30 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 800 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica com Fator Térmico Majorado

Figura 31 - Comparação entre Elevação de Temperatura calculada com base em TC de referência e com base em termopares ao redor do TC sob ensaio.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades típicas especificadas para óleos minerais isolantes

Tabela 2 - Máxima viscosidade e máximo ponto de fluidez em relação à temperatura de início de energização para operação em regiões de baixa temperatura ambiente

Tabela 3 - Condições de Falta em Isolamento e Principais Produzidos por cada Falta

Tabela 4 - Valores de rigidez dielétrica e permissividade relativa relacionados ao sistema isolante papel-óleo

Tabela 5 - Reação em cadeia da degradação do óleo mineral isolante

Tabela 6 - Principais soluções construtivas utilizadas atualmente para fabricação de TC de alta e extra-alta tensão

Tabela 7 - Diagnóstico das condições de isolamento a partir dos valores encontrados para o coeficiente de temperatura de TCs isolados a papel-óleo [17]

Tabela 8 - Principais Normas Vigentes para Transformadores de Corrente para Avaliação do Desempenho Térmico

Tabela 9 - Critérios de Estabilização de Acordo com Principais Normas Vigentes

Tabela 10 - Valores Máximos Permitidos para Elevação de Temperatura de Acordo com Principais Normas Vigentes

Tabela 11 - Valores normalmente adotados como critérios de aprovação para o ensaio de determinação do coeficiente de temperatura α .

Tabela 12 - Principais características das Amostras Submetidas a Ensaio.

Tabela 13- Valores Obtidos para o Coeficiente de Temperatura α para os TCs sob ensaio

Tabela 14 - Quadro comparativo entre Ensaio Realizados com Diferentes Valores de Fator Térmico

Tabela 15 - Valor da Elevação de Temperatura representado como porcentagem da elevação de temperatura máxima em função dos múltiplos da constante de tempo térmica

Tabela 16 - Resumo dos Ensaio de Estabilidade Térmica Realizados.

Tabela 17 - Valores obtidos para Correção de Elevação de Temperatura por Perdas Dielétricas de Resultado de Ensaio Realizado com apenas Aplicação de Corrente

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

2FAL	2-furfuraldeido
A	Coeficiente de expansão
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
A/mm ²	Ampère por milímetro quadrado
°C	Grau Celsius
C	Capacitância
C	Calor específico
C ₀	Capacitância entre placas separadas por vácuo
CC	Corrente contínua
cal/g/°C	caloria por grama por grau Celsius
cos	Cosseno
CH ₄	Metano
C ₂ H ₂	Acetileno
C ₂ H ₄	Etileno
CIGRÈ	International Council on Large Electric Systems
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CST	Centistokes
d	Espessura de uma amostra
DBP	2,6 diterc butil fenol
DBPC	2,6 diterc butil para cresol
DP	Grau de polimerização
DP _t	Grau de polimerização no instante t
DP ₀	Grau de polimerização inicial
E	Campo elétrico
Ea	Energia de ativação
F	Força de tensão superficial
f	freqüência
F/cm	Farad por centímetro
F _C	Fator de correção da elevação de temperatura
g/cm ³	gramas por centímetro cúbico
h	Altitude acima do nível do mar
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
Hz	Hertz

I	Corrente Elétrica
I_C	Componente capacitiva da corrente através de um capacitor real
I_{ensaio}	Valor da corrente primária aplicada em um ensaio
I_{Ft}	Corrente primária nominal multiplicada pelo fator térmico
I_R	Componente resistiva da corrente através de um capacitor real
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IV	Índice de viscosidade
J	Densidade de corrente
k	Constante de velocidade da reação de degradação da celulose
K	Kelvin
k_B	Constante de Boltzmann
kg	Kilograma
kV	Kilovolt
kV/mm	kilovolt por milímetro
kV/cm ²	kilovolt por centímetro quadrado
m	metro
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
NBR	Norma Brasileira
P	Perdas
P_{01}	Perda dielétrica específica
Pa	Pascal
P_{diel}	Perdas dielétricas medidas a $U_m/\sqrt{3}$
P_e	Constante de permeabilidade
PE	Polietileno
P_{I2R}	Perdas totais nos enrolamentos corrigidas a 85°C
ppm	Partes por milhão
PVC	Cloreto de Polivinila
Q	Quantidade de água transferida
R	Resistência Ôhmica
R_0	Resistência ôhmica medida à temperatura θ_0
R_t	Resistência ôhmica medida em um instante t
S	Superfície de um objeto
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
T	Temperatura absoluta
TC	Transformador de corrente
Tg δ	Tangente do ângulo delta ou fator de perdas dielétricas
U	Tensão Alternada

U_{cr}	Tensão crítica
U_m	Tensão máxima de operação
ν	viscosidade cinemática
V/m	Volt por metro
W	Watt
W/Km	Watt por Kelvin vezes metro
W/cm ³	Watt por centímetro cúbico
α	Coefficiente de temperatura
δ	Ângulo entre a corrente total através de um capacitor e sua componente capacitiva
ϵ^*	Permissividade relativa complexa
ϵ_0	Permissividade no vácuo
ϵ_r	Permissividade relativa ou constante dielétrica
Δp	Diferença de pressão
$\Delta\theta$	Elevação de temperatura
η	Tensão superficial do líquido
σ	Condutividade CC
λ	Condutividade térmica
θ_0	Temperatura de referência medida no início do ensaio de elevação de temperatura
θ_1, θ_2	Temperaturas de operação
$\theta(t)$	Elevação de temperatura em função do tempo de ensaio
θ_{amb}	Temperatura ambiente
θ_C	Ângulo de contato do líquido com o dielétrico sólido
θ_{ensaio}	Elevação de temperatura obtida em ensaio com um determinado valor de corrente I_{ensaio}
θ_f	Temperatura ambiente no final de ensaio
θ_F	Elevação de temperatura final ou elevação de temperatura máxima
θ_{Ft}	Elevação de temperatura com a corrente primária multiplicada pelo fator térmico I_{Ft} .
θ_m	Elevação de temperatura corrigida para a temperatura ambiente de 30°C
θ_r	Elevação de temperatura corrigida para as condições normalizadas de altitude
θ_{rpd}	Elevação de temperatura corrigida para considerar as perdas dielétricas
θ_t	Temperatura de enrolamento relacionada à resistência R_t
τ	Constante de tempo térmica
ω	Velocidade angular
Ω	Ohm

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Os Transformadores de Corrente de Alta e Extra-Alta Tensão são equipamentos destinados a reduzir as correntes que circulam em circuitos de alta tensão a níveis compatíveis com os instrumentos de medição e proteção, provendo ainda isolamento adequado entre os circuitos primário e secundário.

Dentre as diferentes tecnologias existentes, o TC magnético isolado a papel e óleo se constitui na solução de maior utilização em sistemas elétricos em todo o mundo.

Sob condições de operação, o TC produz perdas provenientes da circulação de corrente em seus enrolamentos, perdas devidas à magnetização dos núcleos e perdas dielétricas resultantes da circulação de corrente através do meio isolante. Estas perdas resultam na elevação da temperatura do TC sob operação, a qual não deve ultrapassar limites estabelecidos nas normas aplicáveis a este equipamento.

Os limites de elevação de temperatura estabelecidos nas normas são definidos a partir das máximas temperaturas admissíveis para os materiais empregados na fabricação destes equipamentos, tais como o óleo mineral isolante e o papel kraft.

O controle adequado das perdas é item de fundamental importância no escopo do projeto de um TC, uma vez que temperaturas excessivas resultam em aceleração do envelhecimento do meio isolante, provocando muitas vezes a falha do TC em operação.

As perdas devidas à circulação de corrente através dos enrolamentos são controladas através de um dimensionamento adequado dos condutores primários e secundários. As perdas nos núcleos magnéticos, sob condições normais de operação, são praticamente fixas e pouco representativas.

As perdas dielétricas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada, sendo, dessa forma, de maior relevância para equipamentos que operam em sistemas de tensões mais elevadas. As perdas dielétricas de um TC de classe de tensão de 800 kV são, como será demonstrado em 3.6, cerca de 10 vezes superiores às perdas de um TC de classe 245 kV de mesma capacitância e fator de perdas dielétricas.

A estabilidade térmica de um TC é atingida quando a quantidade de calor produzida por perdas dielétricas e por efeito Joule, na parte ativa é inferior à quantidade de calor que pode ser dissipada por condução através do isolamento de papel impregnado com óleo [1].

Dessa forma, do ponto de vista de projeto, o valor limite de perdas ôhmicas nos enrolamentos internos à parte ativa para um TC de extra-alta tensão deve ser inferior ao valor limite para um TC de menor classe de tensão.

As perdas dielétricas são originadas por contaminantes no isolamento os quais podem ser coloidais (cola), polares (água ou produtos do envelhecimento dos materiais) ou iônicos (partículas condutoras)[2] [3].

Dentro deste contexto, ressalta-se a importância dos processos de fabricação do isolamento para o controle das perdas dielétricas. Estes processos envolvem fundamentalmente a fabricação da parte ativa, a secagem do papel e o tratamento do óleo mineral.

O desempenho térmico de um TC deve ser avaliado através de ensaios que reproduzam adequadamente as condições nominais de operação. O ensaio tradicional para esta avaliação, denominado ensaio de elevação de temperatura, consiste na aplicação da corrente nominal multiplicada pelo fator térmico ao enrolamento primário do TC, estando os enrolamentos secundários curto-circuitados ou conectados à sua carga nominal [4] [5] [6]. O TC permanece energizado nestas condições até que sejam atingidos os critérios de estabilização.

Este ensaio mostra-se eficaz para equipamentos de menores classes de tensão, mas é insuficiente para a avaliação do desempenho térmico de um TC de extra-alta tensão, uma vez que as perdas dielétricas não são reproduzidas neste ensaio pela não aplicação de tensão ao isolamento principal do TC.

Os critérios de estabilização definidos nas versões ora vigentes das normas ABNT [4] [7] e IEC [5] [8] também se mostram inadequados para os ensaios em TC de extra-alta tensão, os quais são caracterizados por maiores espessuras de isolamento sólido, o que resulta em constantes de tempo térmicas mais elevadas.

Esta dissertação se propõe a discutir e avaliar os métodos existentes para a avaliação do desempenho térmico de transformadores de corrente de extra-alta tensão, considerando a influência das perdas dielétricas e os valores elevados de constante de tempo térmica, bem como apresentar resultados de ensaios realizados que servem de base para esta discussão.

O capítulo dois apresenta as principais características dos sistemas de isolamento papel-óleo, o qual se constitui no meio isolante de maior utilização entre os equipamentos dos sistemas elétricos de potência. São apresentados conceitos sobre o

papel, o óleo, o uso do papel impregnado com óleo, a influência da umidade e o envelhecimento do meio isolante.

No capítulo três, são abordados aspectos relacionados à utilização do isolamento papel-óleo na fabricação de transformadores de corrente de alta e extra-alta tensão, bem como considerações sobre a estabilidade térmica destes equipamentos.

O capítulo quatro apresenta os principais métodos de ensaios para a avaliação do desempenho térmico de TC de alta e extra-alta tensão. São abordados os métodos existentes nas principais normas, bem como, outros ensaios e métodos propostos na literatura técnica, tais como, documentos do CIGRÉ e artigos técnicos relevantes.

No capítulo cinco, os resultados dos ensaios realizados neste trabalho são apresentados e discutidos.

Finalmente, no capítulo seis encontram-se as conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO

2.1 – INTRODUÇÃO

Os sistemas de isolamento constituem a coluna vertebral de todos os sistemas elétricos de potência. Os diferentes tipos de materiais isolantes que constituem estes sistemas são submetidos a diversos tipos de solicitações dielétricas e térmicas ao longo de sua vida útil. As falhas no desempenho dos meios isolantes dos equipamentos submetidos a tais solicitações causam diversos transtornos à operação das redes elétricas, podendo resultar em desligamentos e imensos prejuízos.

Um conhecimento profundo das propriedades fundamentais dos sistemas dielétricos e dos mecanismos de envelhecimento e falha, bem como, considerações adequadas de projeto, são requisitos fundamentais para a operação segura e confiável dos equipamentos de alta e extra-alta tensão.

O sistema de isolamento de maior utilização nos equipamentos dos sistemas elétricos de potência é o isolamento papel-óleo [2], utilizado principalmente em transformadores tanto de potência, como para instrumentos.

Este capítulo apresenta as características essenciais dos sistemas de isolamento papel-óleo, a influência da umidade em seu desempenho e principais fatores de envelhecimento.

2.2 – CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO

Para o estudo dos sistemas de isolamento papel-óleo inicialmente serão apresentadas as definições das principais características dos meios isolantes. A partir destas definições, discutir-se-á o desempenho dos sistemas isolados a óleo, a papel e finalmente a papel-óleo.

2.2.1 – CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES DOS MEIOS DIELÉTRICOS

2.2.1.1 - PROPRIEDADES DOS MEIOS DIELÉTRICOS

Diversas propriedades dos meios dielétricos possuem importância prática para aplicação dos mesmos em equipamentos de sistemas de potência. As principais características são apresentadas a seguir [2] [3].

2.2.1.1.1 – CONDUTIVIDADE CC

Considera-se um meio dielétrico submetido a um campo elétrico E (V/m), pelo qual flui uma corrente CC (corrente contínua) de intensidade I (A), associada a uma densidade de corrente J (A/m²). A condutividade CC, σ , é definida como a razão entre a densidade de corrente J (A/m²) e o campo elétrico de intensidade E (V/m).

A condutividade CC é função da pureza do material, da temperatura e do campo elétrico ao qual o meio é submetido. Tende a aumentar com o aumento de impurezas, bem como, com o aumento da temperatura e do campo elétrico, obedecendo a uma relação do tipo:

$$\sigma(T) = Ae^{-E/k_B T} \quad (1)$$

Onde, k_B é a constante de Boltzmann e A é uma constante [2].

Devido a efeitos de polarização, σ também depende do tempo de aplicação do campo elétrico. A condutividade CC influencia as perdas dielétricas e define as distribuições de gradiente elétrico em aplicações CC [2].

2.2.1.1.2 – POLARIZAÇÃO

Ao contrário dos condutores, nos quais os elétrons livres estão facilmente disponíveis, a maior parte dos elétrons nos materiais isolantes está limitada e não livre para movimentar-se. Sob influência de um campo elétrico aplicado, as forças eletrostáticas resultantes criam algum nível de polarização, formando dipolos [2].

Em alguns materiais dielétricos cristalinos, um deslocamento relativo ocorre entre íons positivos e negativos produzindo polarização atômica. Em um outro mecanismo que opera em materiais orgânicos incluindo muitos polímeros, dipolos moleculares permanentes são reorientados no campo elétrico.

Há também o mecanismo de polarização interfacial, o qual é observado em materiais heterogêneos.

2.2.1.1.3 – PERMISSIVIDADE DIELÉTRICA

A permissividade dielétrica é determinada pela capacidade de um material polarizar-se em resposta a um campo elétrico aplicado, cancelando parcialmente o campo dentro do material [2]. Também designada como permissividade relativa ou constante dielétrica ϵ_r de um material, pode ainda ser definida pela razão $\epsilon_r = C/C_0$ [2], onde C é a capacitância entre duas placas paralelas separadas pelo material isolante sob estudo e C_0 é a capacitância das mesmas placas paralelas separadas por vácuo, desprezando-se o efeito de borda.

Normalmente ϵ_r não é um parâmetro fixo, mas depende da temperatura, da frequência, bem como da estrutura molecular do material.

2.2.1.1.4 – PERMISSIVIDADE COMPLEXA, ÂNGULO DE PERDAS E FATOR DE DISSIPACÃO

Para o estudo da resposta a tensões alternadas, os sistemas dielétricos são normalmente representados por um modelo composto da associação paralela de um capacitor e um resistor.

O capacitor C representa a própria capacitância do dielétrico e o resistor R representa as perdas resultantes de condutividade iônica ou eletrônica, orientação de dipolos, polarização de cargas ou ainda as perdas oriundas de impurezas no meio dielétrico.

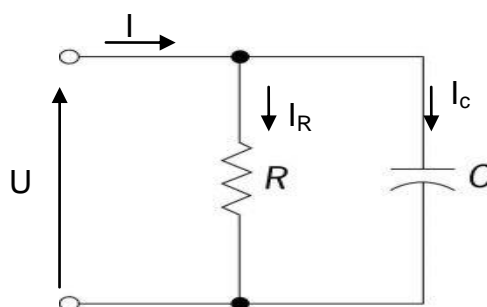


Figura 1 - Representação de um sistema isolante por um capacitor em paralelo com um resistor

Considere uma tensão alternada $u = \sqrt{2}U\sin\omega t$ aplicada ao sistema isolante representado na figura 1. A corrente que circula através deste sistema pode ser decomposta em suas componentes resistiva (em fase com a tensão) e capacitiva (a 90° da tensão). A componente capacitiva da corrente que circula através deste sistema isolante será $I_C = j\omega CU$, sendo a componente resistiva $I_R = U/R$.

Considere o ângulo δ , formado pela corrente I e sua componente capacitiva I_C . A tangente do ângulo δ será igual à razão entre as componentes resistiva e capacitiva da corrente I , como ilustra a figura 2.

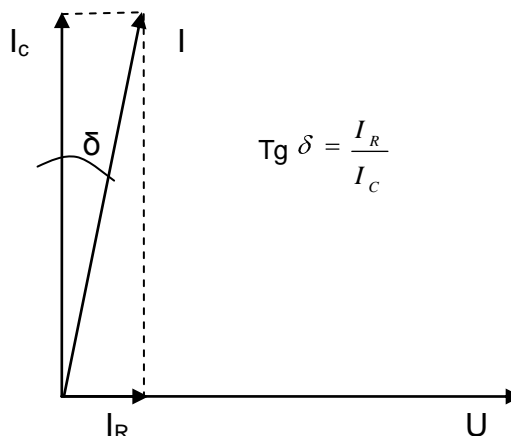


Figura 2 - Representação fasorial da corrente que circula através de um meio isolante e de suas componentes resistiva e capacitiva

Desta relação temos que $I_R = -jI_C \text{tg} \delta$. Uma vez que o ângulo de perdas δ é muito pequeno, $I_C \approx I$ e $I_R = -jI \text{tg} \delta$. Dessa forma, a corrente total $I = I_R + I_C$ pode ser escrita como segue:

$$I = j\omega C_0 U \epsilon_r - j\epsilon_r \text{tg} \delta \approx j\omega C_0 U \epsilon^* \quad (2)$$

onde ϵ^* é a permissividade relativa complexa, tendo uma parte real igual à constante dielétrica ϵ_r e uma parte imaginária igual ao fator de perdas $\epsilon_r \text{tg} \delta$.

A tangente de delta é também conhecida como fator de dissipação dielétrica e geralmente depende da frequência, da temperatura e da tensão aplicada.

Dessa forma, as perdas dielétricas podem ser calculadas como segue:

$$P = \omega C U^2 \text{tg} \delta = \omega C_0 U^2 \epsilon_r \text{tg} \delta \quad (3)$$

A relação entre a tangente de delta e a condutividade σ é

$$\text{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (4)$$

sendo $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m é a permissividade do vácuo.

2.2.1.1.5 – RIGIDEZ DIELÉTRICA

A rigidez dielétrica é o máximo valor de campo elétrico que pode ser aplicado a um material dielétrico sem que este perca suas propriedades isolantes. Este valor é dado em V/m.

A rigidez dielétrica dos isolantes depende fundamentalmente da pureza do material, do tempo e método de aplicação da tensão e do tipo de solicitação ao qual o sistema dielétrico é submetido. Outros fatores ambientais e experimentais podem também influenciar este valor.

Apesar de em muitos casos ser difícil estabelecer um único valor para um dado material, uma faixa de valores pode ser encontrada para aplicações práticas.

2.2.1.1.6 – OUTRAS CARACTERÍSTICAS

Além das características mencionadas até aqui, as quais estão diretamente relacionadas às solicitações dielétricas, outras características são decisivas para avaliação do desempenho de um sistema dielétrico.

Estas outras grandezas envolvem características térmicas e mecânicas, e devem ser consideradas do ponto de vista do projeto e das condições de operação do equipamento no qual o sistema isolante estará contido.

2.2.1.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DIELETRICOS

Os materiais dielétricos são classificados como segue [2].

- a) Gases (sendo o SF₆, o mais utilizado).
- b) Líquidos (óleos minerais, óleos sintéticos)
- c) Sólidos (resinas cicloalifáticas, Cloreto de polivinila PVC, polietileno PE, papel Kraft)
- d) Vácuo
- e) Compostos ou Híbridos (sistemas papel-óleo, PE-óleo)

2.2.2 – SISTEMAS DIELETRICOS PAPEL-ÓLEO

Uma vez que se pretende estudar o meio isolante composto de papel impregnado e óleo mineral, discutir-se-ão inicialmente, considerações relacionadas aos isolantes líquidos, sólidos e compostos.

Um isolante líquido ideal deve ter elevados valores de rigidez dielétrica, resistividade volumétrica, calor específico, condutividade térmica e ponto de fulgor, além de baixos valores de fator de perdas, viscosidade, ponto de fluidez e densidade.

Adicionalmente, o líquido deve ser não corrosivo, não inflamável, não tóxico, quimicamente e termicamente estável, como também apresentar boas propriedades de absorção de gases.

Um isolante sólido ideal, além das propriedades mencionadas para isolantes líquidos, deve apresentar boas propriedades mecânicas e de ligações.

Em aplicações nas quais se utiliza a combinação de materiais para obtenção de sistemas compostos, é importante assegurar que ambos componentes são quimicamente estáveis e compatíveis sob as condições de solicitações elétricas, térmicas e mecânicas às quais o sistema estará sujeito ao longo da vida útil do equipamento.

2.2.2.1 – ÓLEOS ISOLANTES

Os óleos isolantes em equipamentos elétricos, principalmente em transformadores, desempenham fundamentalmente quatro funções, as quais devem ser consideradas para o estudo de suas características [2]:

- Resfriamento: A circulação de óleo ao redor dos enrolamentos contribuindo para remoção do calor originado pela circulação de corrente nos mesmos;

- Isolação elétrica: Por suas propriedades dielétricas o óleo associado a outros materiais isolantes desempenha esta função de isolamento.

- Portador de informações: Tal como o sangue no corpo humano, a análise do óleo pode ser efetuada de forma a detectar-se disfunções no sistema isolante.

- Proteção do material sólido utilizado no sistema isolante em conjunto com o óleo: O óleo isolante é muitas vezes substituível, porém o meio sólido não.

Uma grande variedade de óleos isolantes, naturais ou sintéticos, é utilizada nos equipamentos elétricos. Os óleos minerais são de custo inferior e maior utilização, embora a aplicação de óleos sintéticos seja também de larga utilização.

Os óleos minerais são derivados de petróleo. O petróleo é constituído principalmente de carbono e hidrogênio e possui traços de enxofre, oxigênio e alguns metais, os quais se juntam formando 3 principais tipos de compostos: parafínicos, naftênicos e aromáticos.

A partir do tratamento e da mistura destes compostos, de acordo com as características físico-químicas e dielétricas desejadas, originam-se os óleos minerais utilizados nos equipamentos elétricos.

Estes óleos também possuem muitas vezes, aditivos (substâncias normalmente não presentes no petróleo) cuja mistura resulta em melhores propriedades em relação a oxidação, ponto de fluidez e absorção de gases.

De acordo com a composição da mistura, os óleos minerais podem ser classificados como de base parafínica ou naftênica, conforme o composto predominante no mesmo. Em relação aos compostos aromáticos, presentes em quantidade inferior, os

óleos minerais são classificados como pouco aromáticos, se a presença de tais compostos for inferior a 5% e muito aromáticos se a concentração for superior a 10%.

A maior parte dos óleos minerais utilizados na atualidade em equipamentos de alta tensão são compostos de base naftênica, uma vez que os compostos de base parafínica possuem ponto de fluidez mais elevado (da ordem de -20°C), apresentando problemas para operação a temperaturas mais baixas [2]. Óleos de base naftênica apresentam ponto de fluidez da ordem de -60 a -50°C .

Os principais óleos isolantes sintéticos são subdivididos em: hidrocarbonetos sintéticos (apresentam maior utilização entre os óleos sintéticos, com características similares aos óleos minerais), hidrocarbonetos clorinados (utilização abandonada, apesar de apresentar excelentes propriedades dielétricas, devido a riscos a saúde humana), ésteres, óleos de silicone (apresentam excelentes características dielétricas, porém com custo muito elevado) e poliésteres perfluorados.

A *tabela 1* apresenta algumas propriedades importantes consideradas para óleos minerais isolantes de acordo com as publicações da IEC e ASTM [2].

Tabela 1 - Propriedades típicas especificadas para óleos minerais isolantes

Propriedades	Valores Típicos
Rigidez Dielétrica	≥ 30 kV/mm
Fator de Dissipação a 90°C	0,1 a 0,5%
Suportabilidade a Impulso Atmosférico (gap 25.4mm)	145 kV
Ponto de Fluidez	-30°C
Densidade	0,83~0,89g/cm ³
Viscosidade	3~16 cSt (40°C)
Calor Específico	0,53 cal/g $^{\circ}\text{C}$
Condutividade Térmica	0,14 W/Km
Limite de Estabilidade Térmica	90°C

Três grupos de características devem ser cuidadosamente analisados do ponto de vista de projeto e operação de equipamentos de alta tensão:

- Características de transferência de calor;
- Estabilidade química sob solicitações elétricas;
- Propriedades dielétricas.

2.2.2.1.1 – CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Em um sistema imerso em líquido, o calor é transferido principalmente por convecção. Sob condições de resfriamento atmosféricas naturais a convecção (N) é dada por

$$N = f \left[\frac{K^3 AC}{\nu} \right]^n \quad (5)$$

Onde K = condutividade térmica, A = coeficiente de expansão, C = calor específico por unidade de volume e ν = viscosidade cinemática e n é uma constante entre 0,25 e 0,33. [2]

Verifica-se que a transferência de calor é fortemente dependente da condutividade térmica, dependente em menor grau de A e C e varia inversamente com a viscosidade. Para líquidos, A e C não variam muito, mas ν apresenta maior variação.

Dessa forma, as principais características que influenciam a transferência de calor dos óleos isolantes são a condutividade térmica e a viscosidade.

Baixos valores de viscosidade favorecem a impregnação, quando o óleo é utilizado em sistemas isolantes papel-óleo, conferindo boa performance do sistema do ponto de vista de baixa ocorrência de descargas parciais.

Uma viscosidade elevada somada a um baixo valor de condutividade térmica contribui para a ocorrência de pontos quentes no sistema isolante, os quais são extremamente indesejáveis.

A *figura 3* apresenta uma curva de viscosidade em função da temperatura, para um óleo mineral isolante de base naftênica [9].

A grandeza que exprime a variação da viscosidade com a temperatura é denominada Índice de Viscosidade (IV). O índice de viscosidade é uma grandeza adimensional cujo cálculo é baseado nas medidas de viscosidade cinemática às temperaturas de 40°C e 100° C e sua comparação com os valores de dois óleos básicos, os quais foram definidos como apresentando IV = 0 e IV = 100.

Quanto maior é o índice de viscosidade, menor será a variação da viscosidade com a temperatura. Óleos de base naftênica apresentam índice de viscosidade da ordem de 50 a 80, enquanto o IV para óleos de base parafínica vão de 110 a 140.

O ponto de fluidez e a viscosidade são parâmetros de grande importância também para equipamentos que operam em regiões suscetíveis a temperaturas muito baixas.

A norma IEC 60296 (2003-11) estabelece parâmetros para a máxima viscosidade e máximo ponto de fluidez relacionados com a menor temperatura de início de energização (LCSET- Lowest cold start energizing temperature) [9]. A *tabela 02* apresenta estes valores.

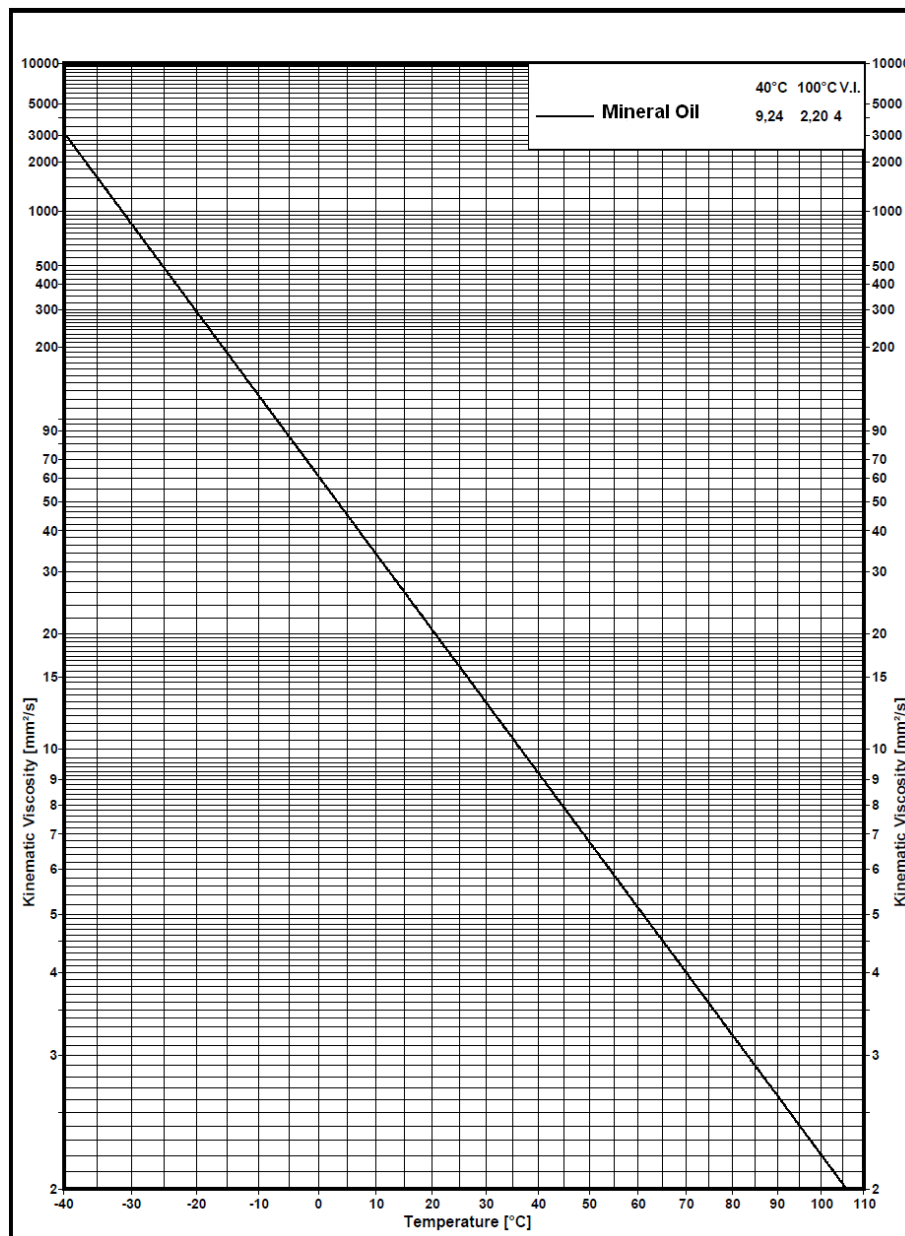


Figura 3 - Relação entre Viscosidade e Temperatura para um óleo mineral isolante de base naftênica [9]

Tabela 2 - Máxima viscosidade e máximo ponto de fluidez em relação à temperatura de início de energização para operação em regiões de baixa temperatura ambiente

LCSET [°C]	Viscosidade Máxima [mm²/s]	Máximo Ponto de Fluidez [°C]
0	1800	-10
20	1800	-30
-30	1800	-40
-40	2500	-50

2.2.2.1.2 – ESTABILIDADE QUÍMICA SOB SOLICITAÇÕES ELÉTRICAS E TÉRMICAS E PROPRIEDADES DIELÉTRICAS

Os equipamentos de alta tensão que possuem óleo isolante em seu sistema de isolamento e resfriamento são constituídos também de outros materiais. Quando em operação, os vários materiais presentes são submetidos a solicitações de origem elétrica e térmica.

Dessa forma, além das solicitações elétricas e térmicas, deve-se também considerar que o óleo será submetido a estas condições em presença de outros materiais, tais como, água, oxigênio, materiais provenientes da decomposição dos isolantes sólidos, óleos solúveis presentes em vernizes e resinas e outros.

Para equipamentos não selados, a oxidação é a mais importante propriedade de deterioração dos líquidos isolantes. A taxa de oxidação aumenta na presença de materiais que agem como catalisadores, tais como o cobre.

Para retardar a oxidação, são utilizados aditivos antioxidantes, tais como o DBPC (2,6 diterc butil para cresol) ou DBP (2,6 diterc butil fenol). Os antioxidantes não impedem a dissolução do cobre no óleo, mas enquanto presentes, eles reagem com os radicais livres, impedindo a oxidação.

Entretanto, à medida que as condições favoráveis a oxidação continuam presentes, os próprios antioxidantes tornam-se lentamente oxidados até que sejam completamente consumidos, resultando na perda de proteção antioxidante para o óleo. Ressalta-se que as características dielétricas do óleo são afetadas pela oxidação.

Além da oxidação, a penetração de umidade no equipamento e a decomposição de partículas que contaminam o óleo também afetam consideravelmente a performance dielétrica do óleo. Pode-se afirmar que todos os óleos isolantes apresentam valores

adequados de rigidez dielétrica, mas esta é significativamente afetada pela presença de contaminantes.

Dentro deste contexto, a rigidez dielétrica é muito mais um parâmetro adequado para avaliar-se o grau de contaminação, do que para análise de suas propriedades isolantes.

Da mesma forma, o fator de dissipação dielétrica, grandeza diretamente relacionada às perdas dielétricas, também se constitui em um parâmetro útil para a avaliação do nível de contaminação do óleo.

A filtragem e a remoção de umidade são medidas usualmente utilizadas para recuperação do óleo de equipamentos que já estiveram em operação.

Outra preocupação corrente relacionada à compatibilidade química do óleo isolante com outros elementos presentes nos equipamentos refere-se à corrosão do cobre pela presença de enxofre ou compostos de enxofre no óleo.

Estudos recentes relatam diversas falhas em equipamentos elétricos nos quais foi observada deposição de sulfeto de cobre no isolamento de enrolamentos de transformadores de potência e reatores de alta tensão [10]. Há ainda trabalhos que indicam uma relação entre as falhas destes equipamentos a elevadas temperaturas de operação.

Existem, no óleo mineral, diferentes tipos de compostos de enxofre os quais apresentam diferentes graus de corrosividade. Durante o processo de refinação do óleo, muitos destes compostos são removidos. Porém, nem todo composto de enxofre deve ser removido, uma vez que tais compostos atuam como inibidores naturais da oxidação.

Os compostos de enxofre não removidos, os quais são normalmente, não corrosivos, podem tornar-se corrosivos para determinadas condições. Tais condições ainda são objetos de estudo.

Como exemplo de estudo [10], foi determinado experimentalmente a conversão de enxofre não corrosivo em enxofre corrosivo após exposição do mesmo a temperaturas elevadas ocorridas, por exemplo, na superfície dos condutores de cobre, resultando na formação de sulfeto de cobre.

A presença de sulfeto de cobre no isolamento de papel impregnado causa a falha do equipamento, uma vez que este possui propriedades condutoras, causando redução da rigidez dielétrica e aumento do fator de perdas dielétricas.

Para mitigação deste problema, iniciou-se a utilização de aditivos passivadores que agem de forma a minimizar a corrosão do cobre pelos compostos de enxofre corrosivo. O passivador protege a superfície do cobre contra o enxofre corrosivo e interrompe a geração de sulfeto de cobre. Entretanto, não age para remoção de depósitos já existentes no papel e no condutor, e é consumido durante a reação.

Outra ação que tem sido recomendada, quando possível, é a substituição do óleo que contém compostos de enxofre corrosivo por outro tipo de óleo. Ressalta-se, porém, que os depósitos previamente existentes também não poderão ser removidos.

Outra importante característica que se deve mencionar para os óleos isolantes refere-se à polarização. Um líquido isolante é considerado como polar, quando este apresenta dipolos permanentes, devido a assimetria de sua estrutura molecular que resulta em um deslocamento dos centros de carga, mesmo na ausência de um campo elétrico externo.

Um líquido isolante não polar é aquele que não produz dipolos na ausência de um campo externo. Os dipolos que são formados quando da aplicação de um campo externo não são permanentes, de forma que seus átomos retornam ao seu estado original quando o campo externo é removido. Os óleos isolantes utilizados nos equipamentos elétricos são líquidos não polares.

As correntes de fuga que circulam através de líquidos isolantes também dependem das características de polarização dos mesmos. Para líquidos polares, a condução ocorre não somente pela presença de impurezas, mas também por mecanismos de dissociação das moléculas do próprio líquido.

Nos dielétricos líquidos não polares, a condução depende fundamentalmente da presença de impurezas dissociadas.

2.2.2.1.2 – O ÓLEO ISOLANTE COMO PORTADOR DE INFORMAÇÕES

Além das funções de resfriamento e isolamento, outra importante função do óleo nos sistemas de isolamento dos equipamentos de alta tensão, principalmente dos transformadores, é a de ser um portador de informações sobre as condições do sistema isolante [2].

Ao longo da vida útil de um transformador, por exemplo, os componentes sólidos de seu sistema de isolamento envelhecem e os produtos da degradação dos mesmos são dissolvidos no óleo isolante. Entre os produtos dessa degradação encontram-se partículas, compostos furânicos, água e ácidos [11].

Além disso, quando o próprio óleo isolante sofre degradação, principalmente quando submetido a elevadas temperaturas as quais provocam a quebra de suas moléculas, ocorre a formação de gases que são dissolvidos no óleo, permitindo sua identificação através de ensaios em amostras.

Este ensaio, denominado *Análise de Gases Dissolvidos* ou *Cromatografia Gasosa* se constitui em uma das práticas mais difundidas para análise da situação de equipamentos em operação [12], dada a dificuldade da utilização de outros métodos em campo.

Esta análise é utilizada para óleos minerais, para os quais existem parâmetros estabelecidos por normas internacionais. Para outros tipos de óleo tais como, esters sintéticos, óleos de silicone ou óleos vegetais, não existem ainda parâmetros estabelecidos para a avaliação.

A geração de gases ocorre em condições normais de operação, porém em níveis baixos. Elevadas concentrações de determinados gases indicam condições de falta.

Alguns exemplos de gases que podem indicar condições de falta são apresentados na *tabela 3* [2].

Tabela 3 - Condições de Falta em Isolamento e Principais Produzidos por cada Falta

Condições de Falta	Principais Gases produzidos
Pontos quentes (no óleo)	C ₂ H ₄ (Etileno) e H ₂ (Hidrogênio)
Pontos quentes (no papel)	CO (Monóxido de Carbono) e CO ₂ (Dióxido de Carbono)
Descargas Parciais (no óleo)	H ₂ (Hidrogênio) e CH ₄ (Metano)
Descargas Parciais (papel)	CO (Monóxido de Carbono)
Arco Elétrico (no óleo)	H ₂ (Hidrogênio) e C ₂ H ₂ (Acetileno)

2.2.2.2 – PAPÉIS ISOLANTES

Os isolantes sólidos desempenham duas funções fundamentais nos sistemas isolantes aos quais estão inseridos: isolar eletricamente condutores entre os quais haja diferença de potencial elétrico e conferir suportabilidade mecânica ao sistema diante dos esforços aos quais são submetidos durante sua operação.

Os materiais sólidos orgânicos, cuja matéria prima é de origem vegetal ou animal, possuem excelentes propriedades isolantes, porém deterioram-se rapidamente quando a temperatura de operação excede 100°C. Dentre estes isolantes, destacam-se os papéis dielétricos, utilizados em capacitores, cabos e transformadores.

Os papéis dielétricos são produzidos de uma variedade de materiais tais como madeira, algodão, fibras orgânicas, cerâmicas e mica. Os isolantes de papel com espessura superior a 0,8mm são chamados de papel cartão (“pressboard” ou “transformerboard”). O papel de maior utilização para aplicações dielétricas é o papel Kraft [2].

As características do papel isolante, tais como densidade e espessura, variam de acordo com a aplicação. Papéis de baixa densidade ($0,8\text{g/cm}^3$) são mais utilizados para capacitores de alta frequência e cabos, de densidade média são mais utilizados para capacitores de potência, e de alta densidade são empregados para capacitores destinados a armazenamento de energia e isolamento de máquinas elétricas de sistemas de corrente contínua [2].

Uma vez que os papéis são muito higroscópicos, para aplicações dielétricas, estes devem ser adequadamente secados e impregnados com óleo. Essa elevada higroscopia deve-se à disposição irregular e cruzada de suas fibras que resulta em grande número de interstícios, os quais são ocupados por líquido isolante no processo de impregnação.

A constante dielétrica do papel impregnado dependerá das permissividades da celulose e do líquido impregnante, bem como, da densidade do papel. A densidade do papel influenciará na facilidade de impregnação do mesmo pelo líquido isolante utilizado.

As perdas dielétricas nos papéis isolantes dependem dos processos de polarização eletrônica, da presença de impurezas iônicas, bem como da presença de bolhas ou fissuras por falhas no empacotamento. Tais perdas aumentam com o aumento do campo elétrico aplicado e com o aumento da temperatura [2].

A ruptura dielétrica do papel isolante, como também de qualquer isolante sólido, traz conseqüências mais severas uma vez que o papel é um meio totalmente não regenerativo. Dessa forma, descargas através deste meio isolante produzirão deterioração irreversível.

Dentro deste contexto, pode-se afirmar que a vida útil de um transformador de potência é determinada pela vida útil do isolamento sólido, constituído, na maioria das vezes por papel impregnado com óleo mineral.

O papel mais utilizado é o *Kraft*, cujo processo de preparo da pasta celulósica é denominado processo Kraft ou sulfato. Este papel é formado por fibras de celulose extraídas principalmente da madeira. As fibras são formadas por moléculas de celulose

de diferentes comprimentos, unidas por ligações de hidrogênio pelos grupamentos de hidroxila.

No processo de fabricação, a celulose passa por tratamento químico a fim de reduzir a quantidade de compostos denominados ligninas e pentoses, resultando, após tratamento, em uma composição química de cerca de 89% de celulose, 7 a 8% de pentoses e 3 a 4% de ligninas [13].

As ligninas são polímeros amorfos que conferem firmeza e solidez ao conjunto de fibras de celulose, porém possuem alta reatividade frente a agentes oxidantes [13].

As moléculas de celulose são constituídas por longas cadeias de anéis de glicose. O número médio dos anéis de glicose das moléculas determina o *grau de polimerização* do papel. O papel Kraft novo apresenta um número médio de anéis de glicose por fibra da ordem de 1000 a 1400 unidades [13].

O grau de polimerização é o principal fator de avaliação do envelhecimento do papel. O envelhecimento consiste na quebra dos anéis de glicose, e na conseqüente redução do grau de polimerização.

Além do papel Kraft comum, outro tipo de papel de utilização significativa é o papel *termoestabilizado*. Introduzido no final da década de 50, este tipo de papel apresenta velocidade de degradação térmica inferior à do Kraft comum.

A produção do papel termoestabilizado consiste em submeter o papel Kraft a tratamentos químicos especiais para melhoria de seu desempenho térmico.

Há ainda o papel Nomex (poliamida), também utilizado como espaçador, no enchimento de bobinas e isolamento de terminais, o qual suporta temperaturas da ordem de 180 a 200°C.

2.2.2.3 – SISTEMAS DE PAPEL IMPREGNADO COM ÓLEO

Apesar do surgimento de diversos materiais sintéticos, tais como o polipropileno, os quais apresentam menores perdas dielétricas, menor absorção de umidade e elevada suportabilidade dielétrica, a utilização do papel (em especial o papel kraft) em conjunto com o óleo, persiste principalmente por suas características de impregnação e suportabilidade mecânica.

A impregnação é um processo físico interativo e consiste no preenchimento das cavidades do sólido pelo impregnante líquido. Este processo depende de fatores tais como a viscosidade e a tensão superficial do impregnante, a porosidade do sólido, e o ângulo de contato, θ_c , do líquido com o dielétrico sólido. Menores ângulos de contato

entre o líquido e o sólido resultam em rápida penetração do líquido desde a superfície até os poros internos do sólido.

A força de tensão superficial é definida pela expressão a seguir:

$$F = \eta \cos \theta_c \quad (6)$$

Onde η é a tensão superficial do líquido, a qual depende da natureza do impregnante [14].

Uma impregnação incompleta resulta em cavidades não completamente preenchidas que tem como consequência a ocorrência de descargas parciais. Por outro lado, uma absorção excessiva causaria um inchaço que poderia resultar em redução na rigidez dielétrica e na suportabilidade mecânica.

A interação química entre os dielétricos sólido e líquido no processo de impregnação se restringe aos vários processos de lixiviação por meio dos quais componentes iônicos ou de baixo peso molecular migram do sólido para o líquido ou vice-versa.

A presença de contaminação iônica no líquido pode ser detectada pelo aumento na condutividade ou do ângulo de perdas. Este aumento pode resultar em limitações térmicas para equipamentos de sistemas de tensão alternada, como também, pode conduzir a deterioração química a qual dependerá do nível de densidade de corrente e de atividade química dos íons liberados nos eletrodos. A deterioração pode ainda ser intensificada pela presença de umidade e outros contaminantes.

O uso do papel isolante e do óleo mineral para formação de um sistema híbrido constituído de papel impregnado por óleo resulta em um meio dielétrico cuja rigidez dielétrica atinge valores maiores do que os valores obtidos para os componentes do sistema, papel e óleo, separadamente.

A *tabela 04* apresenta valores típicos de rigidez dielétrica e permissividade relativa para cada um dos casos [2]. A rigidez dielétrica do sistema papel-óleo dependerá da eficiência da impregnação, bem como, da presença de contaminantes, umidade ou gases.

Tabela 4 - Valores de rigidez dielétrica e permissividade relativa relacionados ao sistema isolante papel-óleo

Característica	Papel	Óleo Mineral	Papel Impregnado
Rigidez Dielétrica [kV/mm]	10 a 15	20	20 a 40
Permissividade Relativa	4 a 6	2,2	3,5

Dessa forma, o processo de impregnação deve ser antecedido por processos de preparação dos isolantes sólido e líquido.

O óleo deve passar por processo de tratamento para retirada de gases e umidade, o qual envolve circulação, filtragem e secagem. São variáveis de controle deste processo, a vazão da circulação, a temperatura e o tempo.

A preparação do papel consiste em submeter a parte ativa do equipamento a um processo com aplicação de vácuo a uma pressão negativa, que varia em função do tamanho da parte ativa e da quantidade de papel presente, e alta temperatura. Este processo se destina à retirada de gases e umidade que estejam impregnados na parte ativa, principalmente no papel.

A parte ativa deve permanecer sob vácuo até que este seja “quebrado” pelo enchimento com o óleo isolante.

2.2.2.3.1 – O USO DE SISTEMAS DE PAPEL IMPREGNADO COM ÓLEO EM TRANSFORMADORES

A maior parte dos sistemas isolantes utilizados em transformadores imersos em óleo consiste na utilização de papel cartão impregnado ao redor dos enrolamentos de alta e baixa tensão e suportados pelos núcleos magnéticos.

As finas lâminas de óleo dentro da estrutura estratificada do papel cartão resultam em elevada rigidez dielétrica, a qual aumenta com a densidade do papel cartão. Além disso, o óleo que flui entre as estruturas de papel cartão favorece a dissipação de calor de forma que se alcance o desempenho térmico e dielétrico desejado.

A vida útil de um transformador consiste na vida útil de seu sistema de isolamento. No caso de transformadores isolados a papel e óleo, tem-se que a vida útil do transformador depende fundamentalmente das condições de envelhecimento do papel isolante, uma vez que existe possibilidade de recuperação apenas para o óleo.

Maiores informações sobre os processos de envelhecimento serão apresentadas no *item 2.4*.

2.3 – INFLUÊNCIA DA UMIDADE NA PERFORMANCE DOS DIELÉTRICOS PAPEL-ÓLEO

A presença de umidade é um fator de grande influência no desempenho e vida útil de um sistema isolante papel-óleo, causando conseqüências tanto na suportabilidade mecânica quanto na performance dielétrica do mesmo.

De forma geral, a suportabilidade mecânica reduz-se pela metade cada vez que se dobra o teor de água no meio isolante [2]. A taxa de deterioração térmica do papel é

diretamente proporcional ao seu conteúdo de umidade. Distúrbios no equilíbrio de umidade podem causar redução da tensão de aparição de descargas parciais.

O teor de água também pode causar problemas de eletrificação na região de interface entre o papel e o óleo. A presença de água no óleo mineral também pode resultar na formação de bolhas, o que também resulta na ocorrência de descargas parciais.

Tais fatores demonstram a importância em preocupar-se com a presença da umidade nos sistemas isolantes papel-óleo.

2.3.1 – ABSORÇÃO, ADSORÇÃO E MOLHABILIDADE

Há duas formas de sorção de fluidos a substâncias e meios [14]:

Absorção – Quando átomos, moléculas ou íons de um fluido introduzem-se em alguma outra substância, fixando-se na mesma. Este processo pode ocorrer pela fixação de um gás em um sólido ou líquido, ou ainda, de um líquido por um sólido.

Adsorção – Trata-se da adesão de moléculas de um fluido, denominado adsorvato (ou adsorbato), à superfície de outra substância denominada adsorvente. É o processo pelo qual átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de sólidos ou líquidos através de interações de natureza química ou física.

A adsorção aumenta com a pressão do gás ou vapor circundante. Em outras palavras, a adsorção de gás ou vapor sobre a superfície do adsorvente aumenta com a umidade do ar.

As forças que atraem o adsorvato podem ser de natureza física ou química, podendo a adsorção ser classificada como física ou química.

Na adsorção física, também chamada fisissorção, as moléculas do adsorvente e do adsorvato interagem por interações de van der Waals, as quais são fracas e não formam ligações químicas. Uma molécula fisicamente adsorvida retém sua identidade, embora possa ser deformada pela presença dos campos de força da superfície.

Na adsorção química, ou quimissorção, os átomos ou moléculas do adsorvato unem-se à superfície do adsorvente através da formação de ligações químicas, em geral covalentes.

Durante a adsorção física, as forças de adsorção são da mesma natureza das forças de interação intermoleculares em gases, líquidos e sólidos.

A adsorção de um líquido por um sólido é denominada molhabilidade [14].

A molhabilidade é a capacidade que tem um líquido de estender-se e deixar um rastro sobre um sólido. Esta depende das interações intermoleculares entre as moléculas superficiais de ambas as substâncias. Pode ser determinada a partir do ângulo que o líquido forma na superfície de contato com o sólido, denominado ângulo de contato; quanto menor é o ângulo de contato, maior é a molhabilidade [14].

2.3.2 – FORMAS E TIPOS DE LIGAÇÕES ENTRE UMIDADE E DIELETRICOS

A permeabilidade, a umidade e a sorção de água em um material são determinadas por seu estado físico, efeitos de superfície e estrutura molecular, incluindo, no caso de um polímero, a estrutura química de ligações cruzadas e cadeias.

As propriedades do material umidificado dependem da forma e do tipo de ligação entre a umidade e a substância do material seco.

As formas de ligação entre umidade e materiais podem ser divididas em três grandes grupos: ligações químicas, físico-químicas e físico-mecânicas.

As ligações químicas envolvem as ligações iônicas, formadas a partir de reações químicas, e as ligações moleculares, as quais envolvem a formação de cristais hidratados. Durante um processo de secagem, a umidade ligada quimicamente não é removida.

As ligações físico-químicas ocorrem em diferentes proporções. Um exemplo deste tipo de ligação ocorre com as reações de adsorção. Quando um líquido ligado por adsorção é colocado em contato com a superfície de um material, uma grande quantidade de calor é liberada, especialmente durante a formação da primeira camada monomolecular.

A primeira camada de água está sob uma alta pressão devido ao campo de força molecular que causa um aumento na densidade do líquido. A água ligada por adsorção tem as propriedades de um corpo contínuo resiliente cujas finas películas, com espessuras da ordem de 0,1µm, produzem um efeito de reforço. A condutância elétrica da água ligada por adsorção é menor do que da água livre.

As ligações físico-mecânicas são essencialmente a retenção de água em proporções indefinidas. Este tipo de ligação inclui ligações estruturais (quando o líquido torna-se ligado durante a formação de uma estrutura de gel), ligações capilares e ligações de molhagem, ou seja, quando a água é colocada em contato direto com a superfície de um corpo.

2.3.3 – DIFUSÃO DE UMIDADE E PERMEABILIDADE

Qualquer material isolante colocado em uma atmosfera úmida absorverá certa quantidade de umidade. A princípio, vapores de água são adsorvidos na superfície, depois os vapores de água são difundidos tendendo a reduzir o gradiente de concentração de umidade e depois disso (se há uma membrana separando dois espaços com concentrações diferentes de vapor de água) os vapores de água são desorvidos para a região de menor concentração de vapor.

Com um material muito umedecido e ar seco em volta, a umidade se difunde em direção ao ar seco e é desorvido na atmosfera circundante, ou seja, o material se seca.

Isto pode sugerir que o processo de difusão da umidade em um material isolante ocorre, como uma regra, quando o equipamento elétrico não está operando. Quando o equipamento elétrico conduz corrente, a umidade é difundida do material isolante o qual se seca.

A uma elevada umidade relativa, uma camada de água polimolecular é formada na superfície do material isolante. Quanto maior é a umidade relativa, maior será a espessura desta camada. A adsorção e a molhabilidade dependem da polarização do dielétrico. Quanto maior é a polarização, maior será a adsorção de vapor e a molhabilidade.

Os materiais isolantes sólidos podem ser classificados em 3 grupos principais em relação ao seu comportamento em atmosferas muito úmidas [14].

- a) Materiais higroscópicos e molháveis;
- b) Materiais não higroscópicos, mas molháveis;
- c) Materiais não higroscópicos e não molháveis.

A difusão pode ser determinada por muitos métodos, tais como, por peso, variação de pressão, equilíbrio de absorção, sorção dinâmica e outros.

O método de variação de pressão é de curta duração e conduz a resultados precisos para determinação das constantes de difusão.

Para determinar-se a permeabilidade à umidade através deste método, o objeto sob teste, na forma de uma membrana, é colocado em uma câmara especial com uma pressão de vapor de água definida de um lado da membrana e uma baixa pressão, da ordem de 10^{-2} Pa do outro lado.

Como os vapores de água permeiam a membrana, a pressão dentro da seção de medição do sistema se eleva. A pressão de vapores de água é medida através de

um manômetro. A constante de permeabilidade [14] pode ser encontrada a partir da equação:

$$P_e = \frac{Qd}{S\tau\Delta p} \quad (7)$$

Onde

Q: Quantidade de água [kg] transferida dentro de um intervalo de tempo τ [s];

S: Superfície do objeto sob teste [m²];

d: espessura da amostra [m];

Δp : diferença de pressão entre os lados úmido e seco da amostra [Pa].

A quantidade de água Q é calculada da equação de Clapeyron [14]:

$$Q = \frac{p_2 v \mu}{RT} \quad (8)$$

Onde

p_2 : é a pressão criada pelos vapores de água penetrando a amostra na seção de medição do sistema [Pa];

v: volume da seção do sistema de medição [m³]

μ : massa molecular da água

T: Temperatura absoluta [K]

R: constante dos gases = 8,2[m³.Pa/K].

Quando um gradiente de temperatura existe em um material isolante molhado, a umidade na forma de líquido ou vapor irá se mover sob o efeito deste gradiente na direção do fluxo de calor. Um dos fatores responsáveis por esta migração de umidade é o movimento molecular dos líquidos e vapores denominado *difusão térmica*.

A pressão de água superficial é baixa em pontos mais quentes. Por isso, a umidade em corpos capilares-porosos se move na direção dos pontos de menor temperatura. A transferência de umidade dentro de um corpo capilar poroso é também promovida pelo aumento no volume de ar aprisionado o qual empurra mecanicamente a umidade através dos capilares.

Dessa forma, *a densidade do fluxo de umidade é diretamente proporcional ao gradiente de concentração ou gradiente de umidade na direção normal de uma superfície isoconcêntrica*. Esta afirmação é denominada *lei da condutância da umidade*.

Outro aspecto importante relacionado a difusão térmica de umidade é a evaporação. De acordo com a lei da evaporação, formulada por J. Dalton, *a quantidade de líquido evaporado é diretamente proporcional à diferença entre as pressões parciais de vapor na superfície do líquido evaporante e na atmosfera ambiente, bem como ao tempo e à área da superfície evaporante*.

Quando o isolante de uma máquina elétrica seca devido a passagem de corrente elétrica pelos condutores do equipamento, estes aquecem o isolante e o fluxo de calor se move do condutor, através do material isolante, para a atmosfera circundante.

Se a atmosfera circundante é o ar, a pressão parcial de vapor na superfície do isolante úmido é maior do que aquela no ar circundante, uma vez que a umidade se move sob o efeito do fluxo de calor, na direção deste fluxo, ou seja, na direção da superfície externa. A diferença nas pressões parciais assegura a migração do vapor da superfície isolante para a atmosfera circundante.

Por outro lado, se o isolante se seca por ação do ar quente, enquanto o condutor não conduz corrente, o fluxo de calor conduzirá a umidade na direção do condutor.

2.3.4 – A UMIDADE NO ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO

Durante a operação de um equipamento isolado a papel-óleo, o mesmo está sujeito a diversas oscilações em sua temperatura. A temperatura influencia as propriedades higroscópicas do papel e do óleo, causando fluxos da umidade do papel para o óleo e do óleo para o papel até que seja estabelecido um equilíbrio. Entretanto, a cada mudança de temperatura, este equilíbrio é quebrado.

A solubilidade da água no óleo aumenta com a elevação de temperatura. Consequentemente, o papel Kraft passa a liberar água para o óleo, visando atingir o equilíbrio. A atração da água pelo papel é maior, uma vez que a capacidade de absorção de água pelo isolamento sólido é da ordem de litros, enquanto que a absorção pelo óleo é da ordem de mililitros.

A umidade pode encontrar-se nos óleos isolantes basicamente sob três formas distintas: na forma de solução, em estado de emulsão ou em dispersão grosseira. A umidade sob a forma de vapor é solúvel no óleo em quantidades que dependem da composição do óleo, da temperatura e da pressão.

Ao atingir a saturação, a quantidade excedente não se encontra em solução, podendo estar sob a forma de emulsão (para partículas de dimensões inferiores a 1 µm). No estado de emulsão, como as partículas de umidade formadas possuem pequenas dimensões, não ocorre precipitação devido às forças de tensão superficial e viscosidade do óleo.

Quando as partículas formadas possuem dimensões maiores, a água se encontra em uma dispersão grosseira e ocorre sua precipitação em forma de gotículas.

A solubilidade da umidade no óleo varia em função de sua composição química quando novo (origem e qualidade do refino) e com seu estado de degradação quando em uso. Outra maneira de expressar o teor de umidade no óleo isolante é através do conceito da solubilidade relativa, que é considerada freqüentemente como umidade relativa do óleo.

A solubilidade relativa é dada pela relação entre o teor de umidade existente no óleo em uma determinada temperatura e o valor do teor umidade da máxima solubilidade para a mesma temperatura. A aplicação mais intensiva deste conceito vem ocorrendo nos últimos anos, em parte pela própria tecnologia de medição sendo desenvolvida, e por permitir uma melhor visualização das correlações entre variáveis envolvidas e comportamentos que envolvem a saturação, isto é a passagem da umidade para o estado de água livre na solução.

Os tempos envolvidos para o estabelecimento da condição de equilíbrio são variáveis e dependem não somente das condições da fonte de umidade, mas também de condições como temperatura e pressão do sistema a ser equilibrado.

O papel isolante é extremamente poroso e absorve uma quantidade de água muito maior que o óleo isolante. O papel Kraft é cerca de 600 a 800 vezes mais higroscópico que o óleo mineral.

A quantidade de água que é transferida da isolação sólida para o óleo está diretamente relacionada à temperatura, sendo que quanto maior a temperatura, maior a transferência da água do papel para o óleo.

A medição direta do teor de água no papel apresenta as dificuldades naturais de acesso ao enrolamento, além do mesmo estar submetido a um elevado potencial elétrico. Por essas razões a medição on-line da umidade no papel só pode ser efetuada de forma indireta, através da medição da umidade no óleo.

Fabre e Pichon e Oommen [15] determinaram que, em condições de equilíbrio, a relação entre a umidade relativa no óleo (% de saturação) e o teor de água no papel (% da massa) é dada pelas curvas mostradas na *figura 4* a seguir.

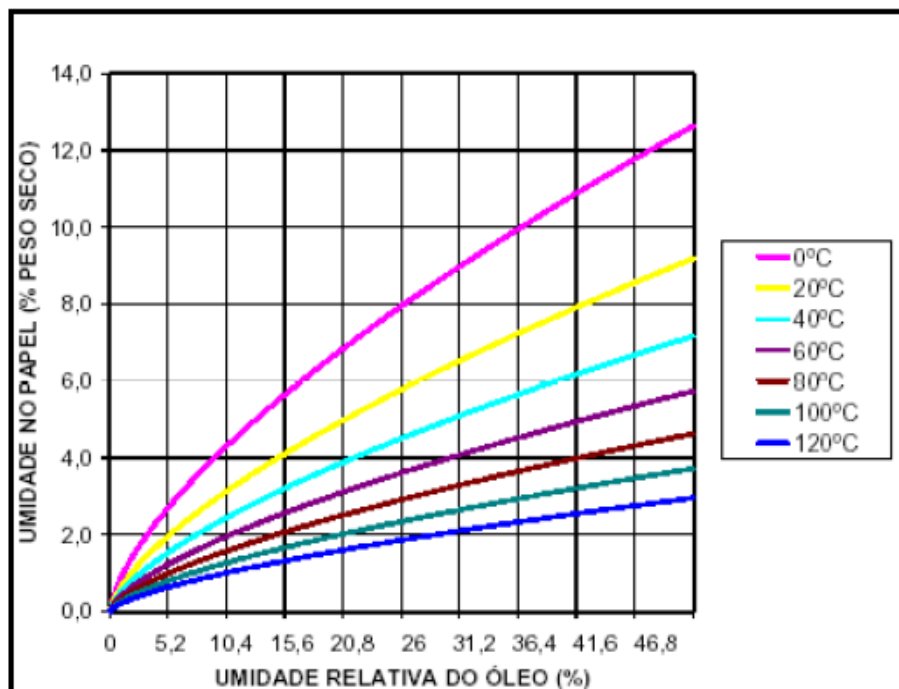


Figura 4 - Relação entre a umidade relativa do óleo e a umidade no papel para cada temperatura de operação

A condição básica para a correta aplicação destas curvas é que exista o equilíbrio entre a umidade no óleo e a umidade no papel, ou seja, não há mais migração de água entre os dois meios [15]. Este equilíbrio é obtido, idealmente, se a temperatura do transformador permanece estável por um longo período de tempo.

Esta condição ideal nunca é alcançada numa aplicação em campo, no entanto uma condição de equilíbrio aceitável é obtida, em temperaturas superiores a 80°C, se a variação total de temperatura for menor que 30°C durante o tempo necessário à migração de água.

2.3.5 – INFLUÊNCIAS DA UMIDADE NAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS, FÍSICO-MECÂNICAS E QUÍMICAS DOS MATERIAIS ISOLANTES

A umidade absorvida ou condensada no isolamento causa redução da resistividade volumétrica, da resistividade superficial, aumento do fator de dissipação e certo aumento na constante dielétrica que também resulta em uma redução na rigidez dielétrica.

Uma vez que as porções saturadas com umidade possuem constante dielétrica muito elevada, a intensidade de campo nas porções menos umedecidas aumenta

abruptamente, causando alterações nas distribuições de potencial dentro do material isolante.

Sob o efeito de elevada umidade e alta tensão, pontes condutoras de corrente podem aparecer ao longo da superfície do dielétrico. Uma fina lâmina condutora pode ser formar entre os terminais do isolante.

Com a circulação da corrente, ocorre um aquecimento localizado que provoca a secagem dessa lâmina condutora em alguns pontos, que causa interrupção brusca da corrente resultando na ocorrência de pequenos arcos causando pontos de carbonização. Estes pontos se unem com o tempo formando uma nova ponte condutora resultando finalmente em um curto-circuito.

A água pura possui uma resistência elétrica relativamente baixa. Porém, quando combinada com outros materiais origina a eletrólise e torna-se um bom condutor. Este fenômeno agrava o efeito da umidade nos dielétricos.

A presença de água em um meio isolante papel-óleo também se constitui em um agente dos processos de envelhecimento, uma vez que a combinação umidade-alta temperatura-campo elétrico favorece fortemente os processos de degeneração tanto do óleo quanto da celulose. Este aspecto será apresentado no *capítulo 4*.

O teor de água também interfere diretamente no fator de perdas dielétricas. A *figura 5* apresenta a influência da adição de água na variação da tangente de delta com a temperatura [2]. As perdas dielétricas são diretamente proporcionais à tangente de delta.

Com o aumento das perdas dielétricas, a temperatura no isolamento também aumenta. A exposição do isolamento a temperaturas superiores a 100°C com presença de umidade e campo elétrico desencadeia os processos de degeneração do meio isolante, dos quais a água é um dos produtos.

Com a liberação de água, ocorre novo aumento nas perdas dielétricas, provocando uma reação em cadeia que levará o equipamento à falha térmica.

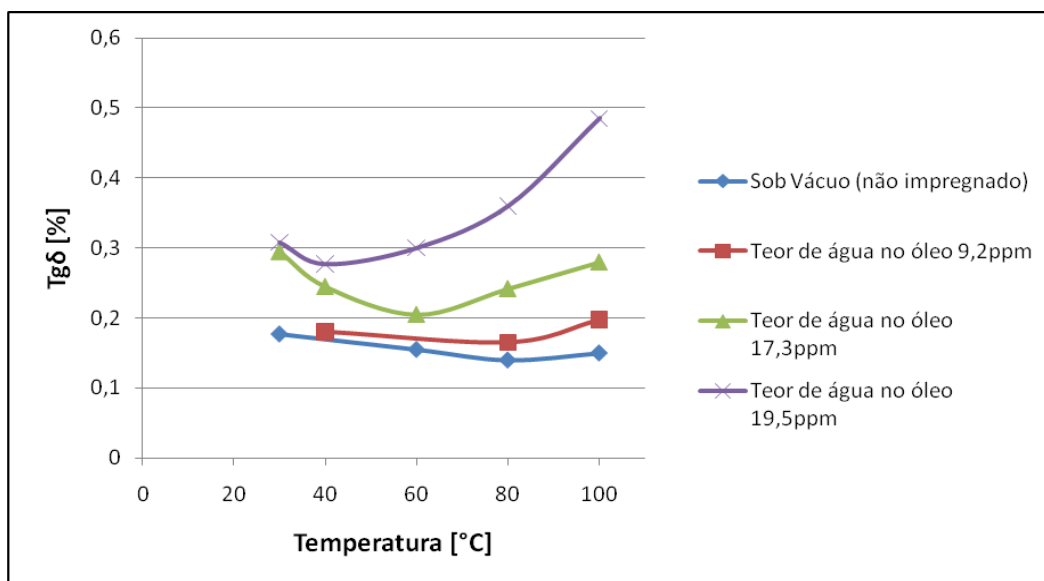


Figura 5 - Efeito da umidade na tangente de delta do papel impregnado com óleo [2]

2.4 – ENVELHECIMENTO DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO

A vida útil dos equipamentos dos sistemas de alta tensão é determinada principalmente pela vida útil de seu sistema isolante.

O dimensionamento dos sistemas isolantes é determinado a partir das condições de operação conhecidas e especificadas, tais como, máxima tensão de operação em regime permanente, limites de temperatura e suportabilidade a solicitações transitórias, as quais são representadas pela suportabilidade a impulso e outras sobretensões de curta duração.

Os valores de referência para tais condições de operação são estabelecidos pelas normas aplicáveis e a suportabilidade do isolamento a tais condições é verificada através de ensaios, os quais também são previstos em normas.

Os sistemas isolantes, mesmo quando operando em condições normais, sofrem redução de sua capacidade ao longo do tempo. Quando submetido a condições mais severas, a vida útil previamente estimada é reduzida.

Para equipamentos que utilizam sistemas isolantes papel-óleo, deve-se considerar que cada um de seus componentes, a celulose e o óleo mineral, possui seus processos próprios de degradação, os quais interagem entre si, de forma complexa e, normalmente, no sentido de reforçar a degradação.

Os principais agentes que influenciam nos processos de degradação deste meio isolante são a presença de umidade, oxigênio e o aquecimento excessivo, cujos efeitos podem ser amplificados pela presença do campo elétrico.

Tendo em vista a possibilidade da troca ou recuperação do óleo isolante, a degradação do isolante sólido torna-se o principal fator determinante da vida útil do sistema papel-óleo.

2.4.1 – A DEGRADAÇÃO DO ÓLEO MINERAL ISOLANTE

Na operação dos equipamentos de alta tensão que utilizam óleo mineral isolante em seu sistema de isolamento, o óleo sofre um processo de degradação resultado das solicitações por temperatura, ação do oxigênio e umidade e de materiais presentes na construção do equipamento, tal como o cobre. A degradação do óleo resulta na redução de sua capacidade isolante e de transferência de calor.

O processo de degradação do óleo mineral ocorre em três etapas distintas. Inicialmente ocorre a formação de peróxidos, os quais são substâncias que apresentam uma ligação oxigênio-oxigênio e que contém o oxigênio em estado de oxidação.

Os peróxidos liberam oxigênio que em contato com o papel formam os compostos oxi-celulósicos. Na etapa seguinte ocorre a formação de gases e, na etapa final ocorre a formação de borra que consiste em uma substância resinosa resultante da polimerização a partir de ácidos e outros compostos.

O processo que rege a oxidação dos hidrocarbonetos é o mecanismo da peroxidação, o qual ocorre por meio de uma reação em cadeia com quatro etapas, conforme apresentado na *tabela 5 [16]*.

Tabela 5 - Reação em cadeia da degradação do óleo mineral isolante

Descrição da Reação	Reação
Formação do radical livre	$R-H \xrightarrow{O_2} R\bullet$
Formação de radical peróxido	$R\bullet + O_2 \longrightarrow R-O-O\bullet$
Formação do hidroperóxido	$R-O-O\bullet + R'-H \longrightarrow ROOH + R'\bullet$
Transformação do hidroperóxido em radical peróxido	$ROOH + 1/2O_2 \longrightarrow ROO\bullet + \bullet OH$

A partir da formação dos hidroperóxidos, muitos produtos intermediários da oxidação são formados, de acordo com a espécie do hidroperóxido que lhe deu origem. Estes produtos intermediários se constituem em alcoóis, aldeídos e cetonas, os quais na presença de oxigênio permitem a formação de ácidos carboxílicos. Os produtos finais

decorrentes da oxidação do óleo são compostos que possuem moléculas polares e características ácidas, sendo estes agressivos ao papel isolante, contribuindo para a formação de radicais livres e água. A água formada contribui para a seqüência do processo de deterioração do óleo isolante.

2.4.2 – A DEGRADAÇÃO DO PAPEL ISOLANTE

O envelhecimento da celulose utilizada nos sistemas isolantes depende das condições de operação às quais está submetida e é acelerado pelos efeitos combinados da temperatura, presença de água e oxigênio.

A degradação da celulose está associada à redução de seu grau de polimerização e à destruição de suas ligações inter-fibras. Tais fenômenos provocam redução da resistência mecânica do papel, sem, entretanto, causar redução significativa em sua rigidez dielétrica.

O grau de polimerização (DP) é definido como o número médio dos anéis de glicose das moléculas de celulose.

Os mecanismos predominantes que promovem a degradação da celulose em equipamentos de alta tensão são o envelhecimento térmico, oxidativo e hidrolítico.

O envelhecimento térmico ocorre por meio de modificações nas ligações das moléculas de celulose as quais ocorrem sob ação do calor.

Tais modificações nas ligações resultam em moléculas menores que a original e têm como produtos a água, óxidos de carbono, hidrogênio, compostos furânicos e outros.

No envelhecimento oxidativo, as ligações de hidrogênio que ligam as cadeias poliméricas se tornam mais fracas na presença de oxigênio. Os grupos hidroxila reagem transformando-se em aldeídos, cetonas e ácidos.

Neste processo de oxidação são produzidos CO, CO₂ e H₂O, a qual contribui numa reação secundária de hidrólise.

O envelhecimento hidrolítico ocorre através da ruptura da cadeia de celulose provocada pela água e pelos ácidos, resultando na redução do grau de polimerização. Os principais produtos deste processo de envelhecimento são os compostos furânicos.

Dessa forma, os principais subprodutos dos processos de degradação do papel são:

- gases, tais como o hidrogênio, o metano, o etileno, monóxido de carbono e dióxido de carbono e,

- líquidos, tais como a água e os compostos furânicos.

Dentre os compostos furânicos, o 2-furfuraldeído (2FAL) é o principal indicador de degradação do papel, uma vez que este é o composto furânico que se forma em maior quantidade nestes processos de envelhecimento da celulose [11].

Existem diversos estudos no sentido de propor uma relação que possa ser considerada como regra geral entre a concentração de 2FAL no óleo e o grau de polimerização [11].

A grande vantagem em estabelecer-se esta relação é que ela torna possível a determinação do grau de polimerização da celulose, apenas a partir de ensaios em amostras de óleo, não sendo necessária a coleta de amostras do papel isolante.

O tempo de vida útil da celulose pode ser determinado através dos valores do grau de polimerização inicial e final e da fórmula de Arrhenius.

Representando o inverso do grau de polimerização médio da celulose ($1/DP$) em função do tempo de envelhecimento desta, (t) determina-se a velocidade da reação de degradação da celulose (k).

A energia de ativação (E_a) pode ser então calculada através da fórmula de Arrhenius representando $\ln k$ em função de $(1/T)$, onde T é a temperatura absoluta.

A velocidade da reação de degradação da celulose é considerada proporcional ao número de ligações da cadeia não quebrada.

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt \quad (9) [2]$$

Onde

$DP_t = DP$ no instante t

$DP_0 = DP$ inicial

$k =$ constante

$t =$ tempo de vida da celulose

A constante k é dada por Arrhenius:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{R(T+273)}} \quad (10) [2]$$

T – Temperatura em graus Celsius (°C)

R – Constante dos gases perfeitos = 8,314 J/mole/K

Ea – Energia de ativação = 113 kJ/mole

Considerando o grau de polimerização inicial igual a 1000 e o final igual a 200, ter-se-á:

$$t = \frac{0,004}{A} e^{\frac{13600}{T+273}} \text{ horas} \quad (11) [2]$$

O fator A depende das condições de operação e dos materiais envolvidos. Para o papel Kraft seco impregnado em óleo tem-se, por exemplo, o valor de $1,07 \times 10^8$.

Quanto ao valor da energia de ativação da reação de degradação da celulose, os valores publicados variam de 30 a 130 kJ/mole. Para uma reação de degradação térmica, este valor é da ordem de 85 kJ/mole.

Quando se trata de uma reação de degradação hidrolítica o valor é da ordem de 120 a 130 kJ/mole.

O efeito da umidade como acelerador do processo de degradação térmica da celulose pode ser observado no exemplo a seguir. Para o papel cartão seco, ou seja, com teor de umidade inferior a 1% a energia de ativação da reação de degradação é da ordem de 56 kJ/mole.

Nas mesmas condições, porém com papel cartão com teor de umidade de 4%, a energia de ativação necessária para a reação de degradação cai para apenas 37 kJ/mole.

Ainda para ilustrar o efeito da umidade na aceleração do envelhecimento do papel, a *figura 6* apresenta a variação do grau de polimerização em função do tempo de operação para 3 casos [11].

Para todos os casos, considera-se um transformador operando à temperatura de 90°C. O caso A refere-se à operação em condições ideais. O caso B refere-se a operação em condições reais. O caso C considera a operação em condições reais, porém com um teor de água inicial no papel de 2% [11].

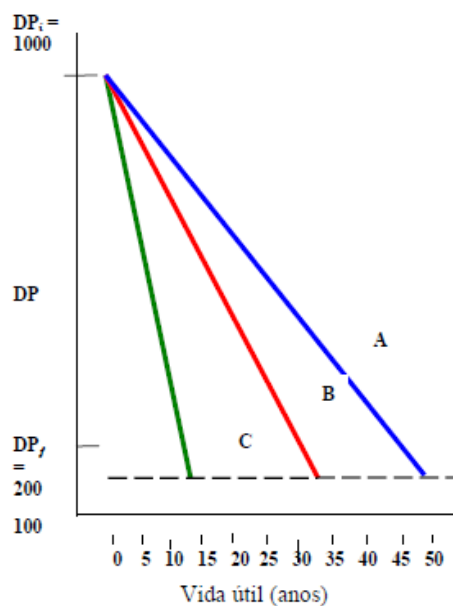


Figura 6 - Vida útil de um transformador em condições ideais (A), em condições reais (B) e em condições reais, porém com teor de água no papel inicial de 2% (C). Variação do grau de polimerização com o tempo de operação. [11]

O envelhecimento do papel isolante pode ocorrer em três momentos distintos:

- Durante os processos de secagem na fabricação do equipamento;
- Durante estocagem;
- Durante a operação do equipamento.

Estudos estabelecem como admissível uma redução de até 10% no grau de polimerização da celulose durante os processos de secagem da parte ativa na fabricação. Considerando que o fabricante utilize papel de boa qualidade, o grau de polimerização inicial varia entre 1200 e 1300.

O mínimo grau de polimerização admissível, após término da secagem é de 1000.

2.4.3 – RECUPERAÇÃO DE ÓLEO MINERAL ISOLANTE DEGRADADO

Existem diferentes processos os quais podem ser empregados para os casos de óleo mineral isolante degenerado.

Quando o óleo apresenta elevado teor de água, de partículas, ou ambos, o processo termo-vácuo é então empregado. Em diversos casos, este processo é realizado sem que o transformador seja desenergizado.

Consiste na conexão da unidade de tratamento ao transformador e a circulação do óleo entre o transformador e a unidade de tratamento, de forma que o volume total de óleo circule pela unidade de tratamento pelo menos, seis vezes. Os resultados de um

tratamento termo-vácuo realizado de forma adequada são a redução das partículas, redução dos gases dissolvidos no óleo, redução do teor de água e a conseqüente elevação da rigidez dielétrica.

A regeneração do óleo aplica-se para retirada de água e compostos ácidos até um nível aceitável, trazendo ainda como benefício a elevação da tensão interfacial. Trata-se também de um procedimento que pode ser aplicado sem necessidade de desenergização do equipamento.

Neste processo, o óleo é bombeado através de recipientes de argila filtrante, nos quais ficam retidos contaminantes e os produtos da oxidação do óleo. É comum a integração deste processo ao tratamento termo-vácuo.

Quando o óleo apresenta tensão interfacial muito baixa e/ou índice de acidez muito elevado, deve-se proceder a substituição do óleo isolante. A substituição do óleo envelhecido por óleo novo ou regenerado implica obrigatoriamente da desenergização do equipamento, uma vez que todo o óleo degenerado é bombeado e a parte ativa e as paredes internas do tanque do equipamento são lavadas com o óleo novo ou regenerado que será utilizado.

Os processos empregados para remoção do teor de água do óleo mostram-se de baixa eficiência ou ineficazes para o isolamento sólido por duas razões fundamentais. O papel isolante é cerca de 800 vezes mais higroscópico que o óleo mineral, o que dificulta a transferência de umidade do papel para o óleo.

Além disso, uma vez que a parte ativa permanece à temperatura ambiente, a transferência de umidade do papel para uma atmosfera de alto vácuo torna-se extremamente lenta.

Embora os processos de regeneração do óleo mostrem-se satisfatórios para retirada de água, partículas e redução da acidez, nenhum deles é eficaz para a retirada dos compostos intermediários do processo de oxidação do óleo, tais como, compostos carbonilados os quais são precursores dos ácidos carboxílicos no processo de oxidação. Dessa forma, a vida útil do óleo regenerado é reduzida, em comparação ao óleo novo.

Trabalhos sugerem a utilização de processos com polímeros funcionalizados para a retirada dos compostos carbonilados, contribuindo para um aumento da vida útil dos óleos regenerados [16].

Capítulo 3

O ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO APLICADO A TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO

3.1 – INTRODUÇÃO

Grande parte dos estudos realizados sobre o isolamento papel-óleo tem como foco principal os transformadores de potência. Este fato justifica-se por razões relacionadas ao custo dos equipamentos, uma vez que os transformadores de potência representam a maior parcela de custo de equipamentos dentro de uma subestação.

Entretanto, quando se considera equipamentos da rede básica, a falha de qualquer tipo de equipamento pode trazer prejuízos incalculáveis.

Este capítulo destina-se a uma análise do isolamento papel-óleo quando utilizado em TC de alta e extra-alta tensão.

3.2 – CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA O ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO DE TC DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO

O isolamento papel-óleo de TC de alta e extra-alta tensão utiliza normalmente camadas de papel Kraft plano ou crepado, totalmente impregnadas com óleo. O papel passa por um processo de secagem e desgaseificação, sendo em seguida impregnado à vácuo com o óleo mineral.

O papel é aplicado na forma de tiras com o uso de máquinas de enrolamento ou manualmente. A suportabilidade dielétrica deste tipo de construção no plano perpendicular ao papel é muito elevada. Entretanto, nos canais de óleo longitudinais ao papel, a tensão disruptiva é consideravelmente baixa.

Dessa forma, é muito importante que as camadas de papel sejam dispostas com suficiente sobreposição de forma a evitar canais de óleo contínuos perpendiculares às camadas de papel, como mostra a *figura 7* [17]. A existência de canais de óleo contribuiu para a ocorrência de descargas parciais o que pode conduzir o TC à falha dielétrica.

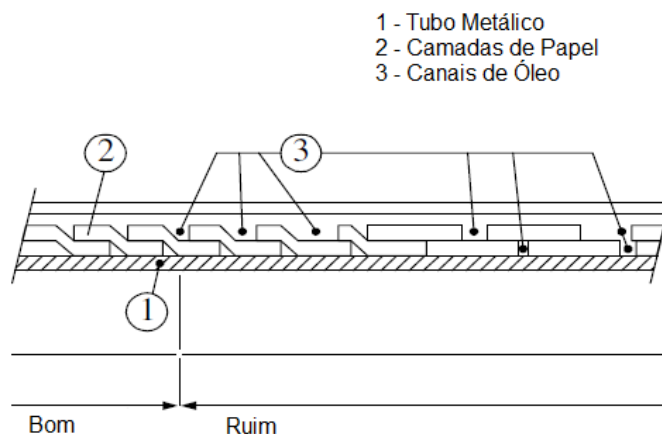


Figura 7 - Sobreposição de camadas de papel para evitar canais de óleo no isolamento papel-óleo de TC

Para que haja uma distribuição uniforme de campo elétrico, a geometria das camadas de papel deve ser cuidadosamente projetada e combinada à inserção de blindagens equipotenciais constituídas de telas metálicas ou papel semicondutor. Este assunto será abordado com mais detalhes posteriormente.

A evolução das tecnologias de projeto do isolamento resultou em uma grande redução dimensional destes equipamentos, permitindo a operação em gradientes elevados através de um controle cuidadoso do campo elétrico.

Uma das maiores particularidades do TC isolado a papel-óleo é o reduzido volume de óleo em comparação ao volume de papel.

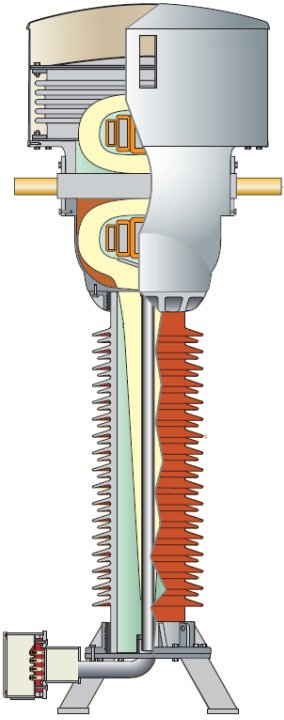

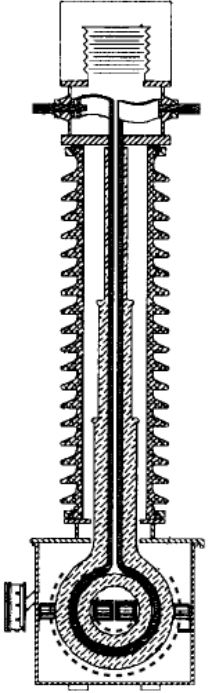
Entretanto, tal redução dimensional exige, também, um maior controle do desempenho térmico do equipamento, uma vez que a função de resfriamento do óleo isolante é reduzida significativamente considerando-se seu volume.

3.3 – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE TC DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO

As principais soluções construtivas [17] de TC de Alta e Extra-Alta Tensão utilizadas atualmente são apresentadas na *tabela 6*.

Em subestações mais antigas é possível encontrar outras soluções, tais como, o TC com circuitos magnéticos em cascata ou o TC com isolamento em cascata, no qual o isolamento está distribuído ao redor do primário e ao redor dos secundários [17], como mostra a *figura 8*. Entretanto, estes tipos de construção já foram praticamente abandonados pelos fabricantes.

Tabela 6 - Principais soluções construtivas utilizadas atualmente para fabricação de TC de alta e extra-alta tensão

<p>Tanque Vivo (Live Tank Design)</p>	<p>Tanque Morto (Dead Tank Design)</p>	
 <p>Fonte: Referência [18]</p>	 <p>Fonte: Referência [19]</p>	 <p>Fonte: Referência [17]</p>
<p>Tipo Invertido (ou “Top Core”)</p> <p>Secundário posicionado no topo. Isolamento principal ao redor do secundário. Camada mais externa do isolamento no potencial pleno.</p>	<p>Tipo “Hairpin”</p> <p>Secundário posicionado na base. Isolamento principal ao redor do primário. Camada mais externa do isolamento no potencial de terra.</p>	<p>Tipo “Eye-bolt”</p> <p>Secundário posicionado na base. Isolamento principal ao redor do primário. Camada mais externa do isolamento no potencial de terra.</p>

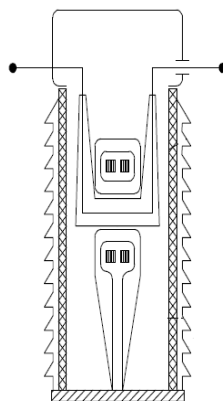


Figura 8 - TC com isolamento em cascata [17]

3.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL PARA O ISOLAMENTO PAPEL-ÓLEO DE TC DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO

Para que haja uma distribuição uniforme de campo elétrico, a geometria das camadas de papel deve ser cuidadosamente projetada e combinada à inserção de blindagens equipotenciais constituídas de telas metálicas ou papel semicondutor.

As telas de blindagem devem ser inseridas de forma que as diferenças de potencial entre telas adjacentes sejam as mesmas ao longo de toda a espessura do isolamento.

Existem duas soluções utilizadas nos projetos de isolamento [17], similares à construção de buchas de alta tensão:

- Utilizando menor quantidade de telas conectadas a eletrodos toroidais (anéis) para evitar elevada concentração de linhas equipotenciais, conforme *figura 9*.

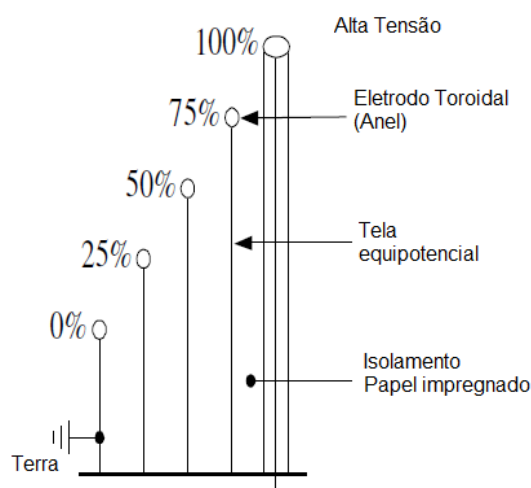


Figura 9 - Configuração para distribuição de potencial ao longo do isolamento com uso de eletrodos toroidais [17].

- Utilizando um grande número de telas com menor diferença de potencial entre as telas. Neste caso, os anéis não são necessários porque o campo elétrico é uniforme nestas regiões. A figura 10 ilustra esta configuração.

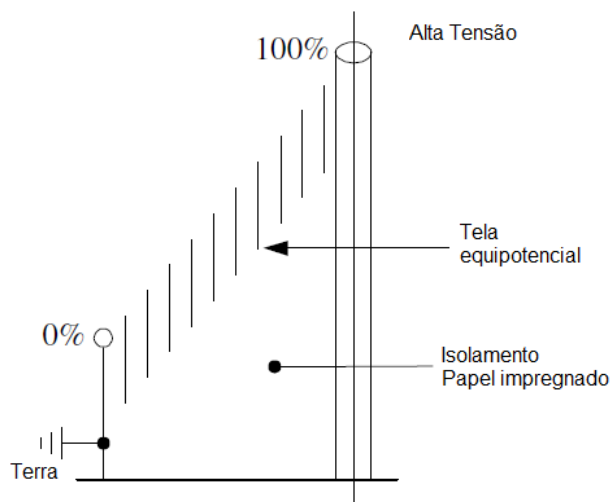


Figura 10 - Configuração para distribuição de potencial ao longo do isolamento utilizando maior número de telas, sem uso de eletrodos toroidais [17].

Nos exemplos apresentados nas *figuras 9 e 10*, o condutor primário (alta tensão) está no centro da construção.

Para o TC de tanque vivo ou invertido, este isolamento similar ao das buchas de alta tensão aplica-se ao tubo que conduz os condutores secundários à base do TC. Este tubo, o qual é fisicamente acoplado à caixa metálica na qual estão os núcleos secundários, constitui-se na blindagem com potencial zero (aterrado). A tela mais externa do isolamento está no potencial de mais alta tensão.

O isolamento em papel impregnado entre a barra primária e a caixa metálica possui apenas algumas telas de equipotencialização.

Normalmente, as telas das extremidades – potencial pleno e terra – são de materiais metálicos, e as telas intermediárias de papel semicondutor.

A *figura 11* mostra uma representação das configurações com e sem uso de eletrodos toroidais para um TC invertido.

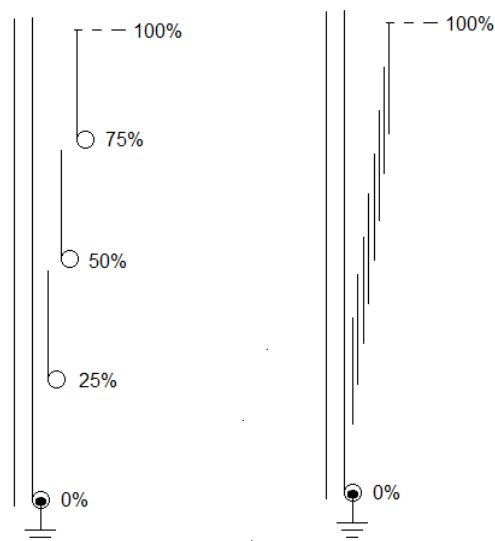


Figura 11 - Configurações com e sem eletrodo toroidal para TC tipo invertido [17]

As telas de equipotencialização são extremamente importantes quando se analisa a performance do isolamento frente aos transitórios de alta frequência decorrentes de operação de chaves seccionadoras, além dos surtos por descargas atmosféricas.

3.5 – CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE SECAGEM DO PAPEL, TRATAMENTO DE ÓLEO E IMPREGNAÇÃO

Após o término da fabricação do isolamento em papel, a parte ativa deve passar por um processo de secagem do papel que envolve um controle adequado das grandezas temperatura, vácuo e tempo.

Para cada modelo de parte ativa deve haver um programa de aquecimento e vácuo levando-se em conta a espessura do isolamento e o nível de perdas dielétricas requerido.

Antes do processo de secagem, o isolamento em papel contém entre 7 e 10% de sua massa em água, sob condições normais de temperatura e pressão. A água contida no papel está em equilíbrio com a pressão parcial de vapor de água ao redor do isolamento.

Com o fim de obter-se uma performance dielétrica adequada em relação a rigidez dielétrica e controle das perdas dielétricas, este volume de água deve ser reduzido para algo em torno de 0,1 e 0,2% através do processo de calor, vácuo e tempo.

A *figura 13* apresenta a relação teor de água em papel não impregnado e a tangente de delta. Nota-se que reduzir o teor de água abaixo de 0,1% não resulta em maiores reduções no valor de tangente de delta [17].

A *figura 14* apresenta a variação da rigidez dielétrica com o teor de água para o papel impregnado.

Durante o processo de secagem, é necessário atingir a temperatura de pelo menos 100°C à pressão atmosférica, antes de iniciar o vácuo. Se a temperatura é muito baixa, ou se o processo de secagem é muito rápido, pode ocorrer formação de gelo nas camadas mais profundas do isolamento.

A máxima temperatura durante o processo de secagem nunca deve exceder 120°C, para evitar-se a degradação térmica do papel. O vácuo deve ser mantido para impedir a degradação em alta temperatura.

Durante o processo de secagem haverá gradientes de temperatura e pressão entre as camadas do isolamento. Dentro deste contexto, a fim de alcançar o mesmo nível de secagem em todo o isolamento, é necessário ajustar o tempo de aquecimento e a duração de vácuo de forma adequada em função da espessura e do projeto do isolamento.

A *figura 12* as condições necessárias para atingir-se a secagem requerida para que o teor de água do papel seja, no máximo de 0,1%. As condições de 110°C e 1 Pa são valores típicos deste processo de tratamento [17].

A *figura 14* apresenta a variação do teor de água no papel em função das condições de temperatura e pressão. Valores típicos para o processo de secagem são 110°C e 1 Pa. A duração, em dias, dependerá da espessura de isolamento.

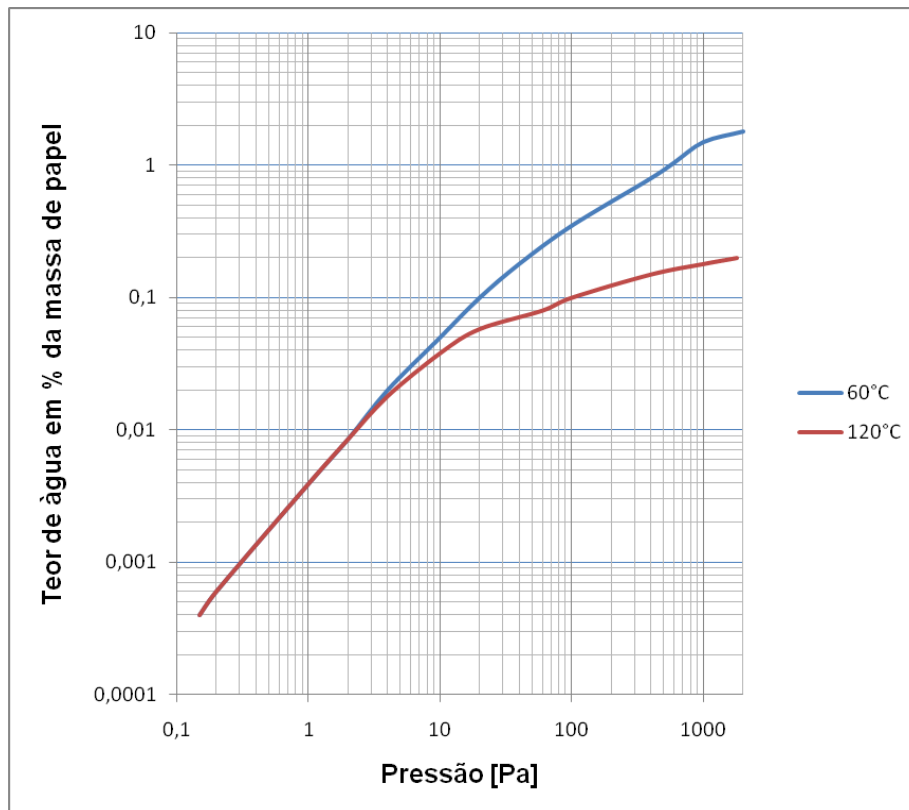


Figura 12 - Secagem de papel: Teor de água em equilíbrio versus temperatura e vácuo [17]

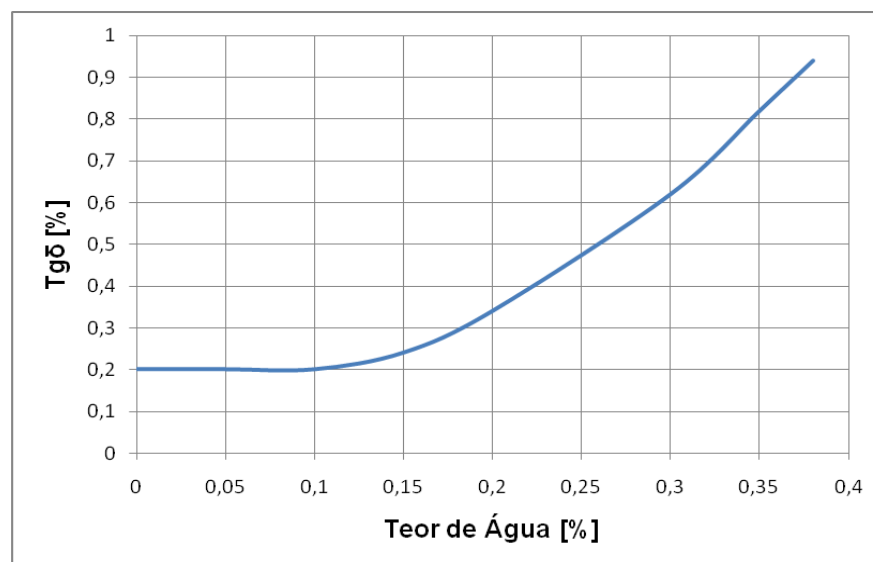


Figura 13 - Tangente de Delta a 90°C em função do teor de água para papel não impregnado [17]

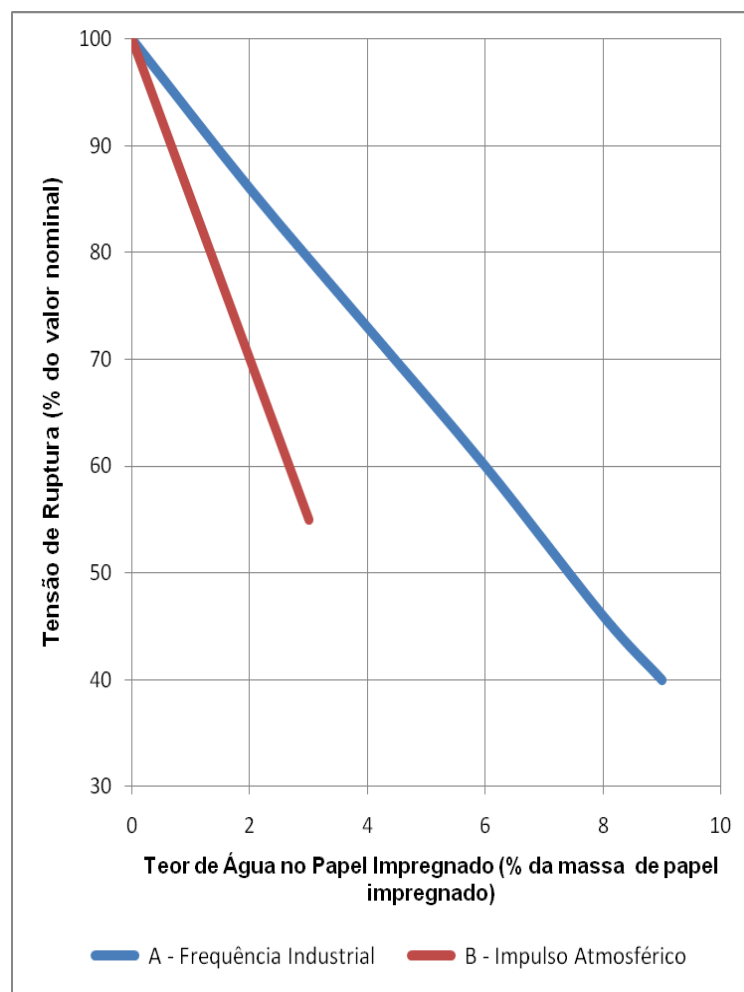


Figura 14 - Tensão de Ruptura versus Teor de água no papel impregnado [17]

O óleo mineral também deve passar por tratamento antes do processo de impregnação. O tratamento do óleo consiste também na secagem e desgaseificação. O teor de água do óleo deve ser inferior a 5ppm e o teor de gases inferior a 0,3%. Estes valores, em conformidade com as normas IEC 296 e IEC 867, garantem elevada rigidez dielétrica e baixos valores de perdas dielétricas [17].

O processo de impregnação envolve o enchimento com óleo tratado sob condições controladas de temperatura, vácuo e duração. A vazão do óleo durante o enchimento também é uma grandeza que influencia o processo de impregnação.

Normalmente, após o processo de enchimento, o TC é selado e passa por um período de descanso antes do início dos ensaios dielétricos. A duração deste período de descanso, o qual se constitui na etapa final do processo de impregnação, varia de acordo com a espessura do isolamento.

Após o final do processo de impregnação, valores típicos de teor de água e gás para um TC novo são: teor de água $\leq 10\text{ppm}$ e teor de gás $\leq 1\%$ [17].

3.6 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIDADE TÉRMICA DO ISOLAMENTO DE UM TC DE ALTA OU EXTRA-ALTA TENSÃO ISOLADO A PAPEL-ÓLEO

Um TC de alta ou extra-alta tensão possui fundamentalmente três fontes principais de calor:

- Calor proveniente das perdas nos enrolamentos primários
- Calor proveniente das perdas nos enrolamentos secundários
- Calor proveniente das perdas dielétricas

As perdas nos enrolamentos primários e secundários estão diretamente relacionadas ao dimensionamento dos condutores que constituem estes enrolamentos, uma vez que estas perdas são resultado do produto da resistência ôhmica do enrolamento pelo quadrado da corrente que circula através do mesmo.

$$P = RI^2 \quad (12)$$

As perdas dielétricas podem ser de origem coloidal (cola utilizada no isolamento de papel), polar (água ou produtos do envelhecimento do óleo) ou iônica (presença de partículas condutoras contaminantes). Tais fatores influenciam no valor da tangente de delta que é diretamente proporcional às perdas dielétricas.

As perdas dielétricas também são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada ao isolamento. Dentro deste contexto, justifica-se uma preocupação ainda maior com estes fatores para classes de tensão mais elevadas.

As perdas dielétricas, conforme apresentado em 2.2.1.1.4, podem ser calculadas em função da tangente de delta à temperatura de operação θ e à tensão de operação U , como segue:

$$P = \omega C_{tg} \delta_{\theta} U^2 \sqrt{V} \quad (13)$$

Considere, como exemplo dois TCs, ambos com capacitância de 1000pF e tangente de delta de 0,2% (ou seja 0,002), porém com tensões de operação de 230/ $\sqrt{3}$ kV e 765/ $\sqrt{3}$ kV a 60Hz. Enquanto as perdas dielétricas do TC de 230 kV resultam em aproximadamente 13 W, as perdas no TC de 765 kV alcançam um valor de 147 W.

Um TC atinge estabilidade térmica em operação se a quantidade de calor produzida pelas perdas dielétricas e por efeito Joule são inferiores ao calor que pode ser dissipado por condução através do isolamento sólido [1].

Considera-se a dissipação apenas por condução uma vez que a circulação de óleo em um TC é praticamente nula, dado o pequeno volume de óleo em comparação ao volume de papel impregnado [1].

A estabilidade térmica do TC depende de um projeto adequado para o controle das perdas nos enrolamentos e de um processo controlado de secagem do papel, tratamento de óleo e impregnação a fim de garantir baixas perdas dielétricas.

A dissipação nos enrolamentos deve ser limitada levando-se em consideração a elevação de temperatura devida às perdas nos enrolamentos, bem como, a influência das perdas dielétricas na elevação de temperatura total do TC.

Do ponto de vista das perdas dielétricas, é necessário limitar o fator de dissipação dielétrica (ou tangente de delta) à temperatura de operação. As perdas dielétricas específicas para um campo elétrico alternado podem ser calculadas, conforme [1], da seguinte forma:

$$p_0 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta \cdot 10^6 \left[\frac{W / \text{cm}^3}{(V / \text{cm})^2} \right] \quad (14)$$

Onde

p_0 : Perda dielétrica específica, por unidade de volume, à temperatura θ e a uma solitação dielétrica de 1kV/cm, à freqüência nominal.

$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14}$ F/cm: Permissividade no vácuo

$\varepsilon_r = 3$: Permissividade relativa para o papel impregnado

$\operatorname{tg} \delta$: fator de perdas dielétricas, o qual é dependente da temperatura de operação e da tensão aplicada ao isolamento.

As figuras 15 e 16 [17] mostram que a tangente de delta depende da temperatura e do esforço elétrico aplicado.

Portanto, de acordo com [1], pode-se estabelecer uma relação entre as perdas dielétricas por unidade de volume à freqüência nominal com a temperatura de operação e o esforço elétrico à tensão de operação, como segue:

$$p, E \approx p_0 e^{\alpha \Delta \theta} E^2 \left[\frac{W}{\text{cm}^3} \right] \quad (15)$$

Onde

$\Delta \theta$: Elevação de temperaturas em °C do isolamento sólido em relação ao líquido isolante

E: Esforço elétrico em [kV/cm]

α : Coeficiente de temperatura, $\alpha = \frac{\ln \text{tg } \delta_{\theta_2} - \ln \text{tg } \delta_{\theta_1}}{\theta_2 - \theta_1}$ em [1/°C] (16)

θ_1 e θ_2 : temperaturas em °C dentro da faixa de operação (normalmente, utiliza-se como referência 20°C e 90°C)

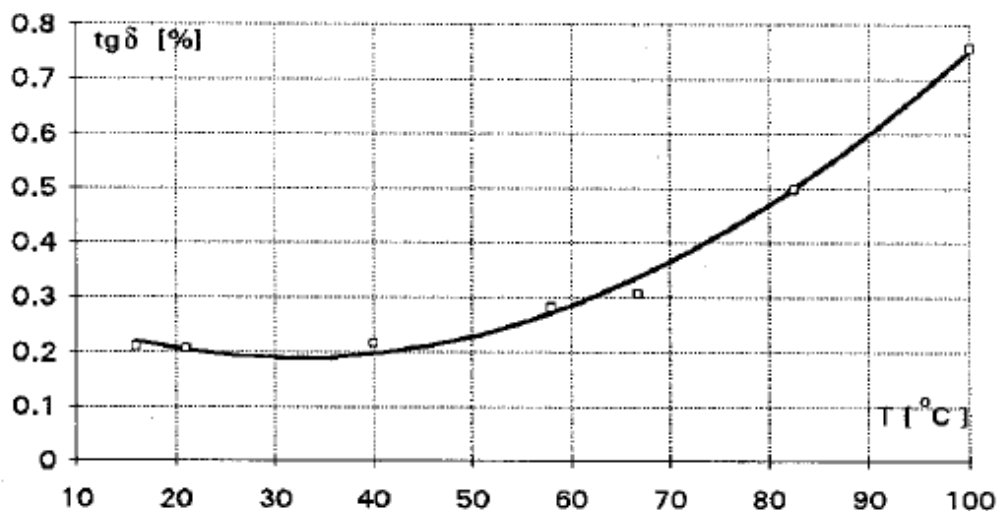


Figura 15 - Dependência da temperatura para a tangente de delta de um TC de 420 kV tipo invertido. [17]

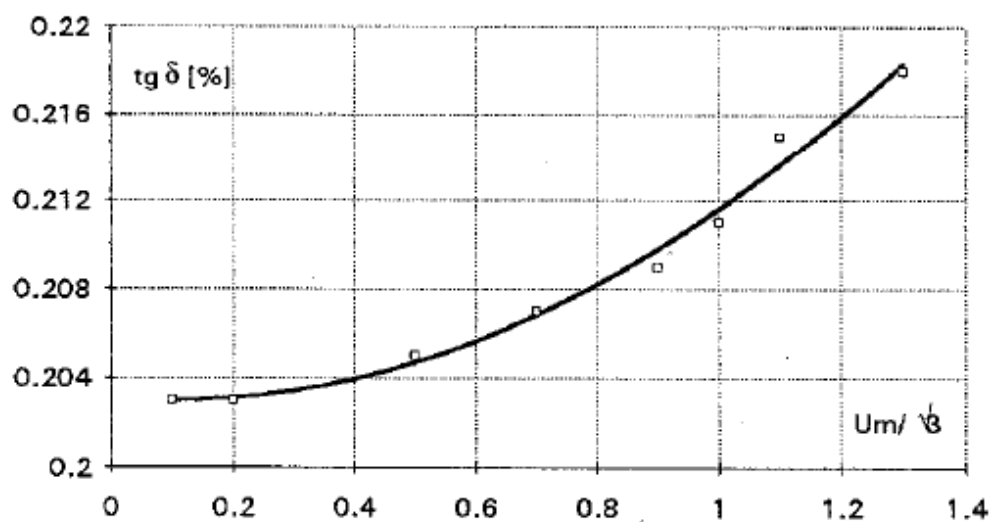


Figura 16 - Dependência da tensão para a tangente de delta de um TC de 420 kV tipo invertido. [17]

3.6.1 – O USO DO COEFICIENTE DE TEMPERATURA PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO ISOLAMENTO

Como visto anteriormente, a relação entre a tangente de delta do isolamento de um TC isolado a papel-óleo com a temperatura pode ser considerada como uma função exponencial cujas variáveis são a tangente de delta à temperatura de 20°C ($tg\delta_1$) e o coeficiente de temperatura α . De acordo com [17], esta relação pode ser descrita como segue.

$$tg\delta_2 = tg\delta_1 e^{\alpha(\theta_2 - \theta_1)} \quad (17)$$

Dessa forma, a partir das medições da tangente de delta a 20°C e a uma temperatura mais elevada, pode-se então calcular o valor do coeficiente α conforme a equação (16).

A *figura 17* apresenta a relação entre a tangente de delta com a temperatura para TC com isolamentos em diferentes condições.

A *tabela 07* apresenta o diagnóstico do isolamento a partir do valor do coeficiente de temperatura determinado a partir de medições da tangente de delta a 20°C e a 80-90°C. Este diagnóstico é resultado de um estudo realizado em diversos TC [17].

Em um outro estudo [17], 40 TCs com elevado teor de água no isolamento foram submetidos a medições de tangente de delta a 20°C e a 80-90°C para a determinação do coeficiente α . Os valores, apresentados em gráfico na *figura 18* como uma distribuição de Gumbel, tenderam ao intervalo entre 0,03 e 0,06.

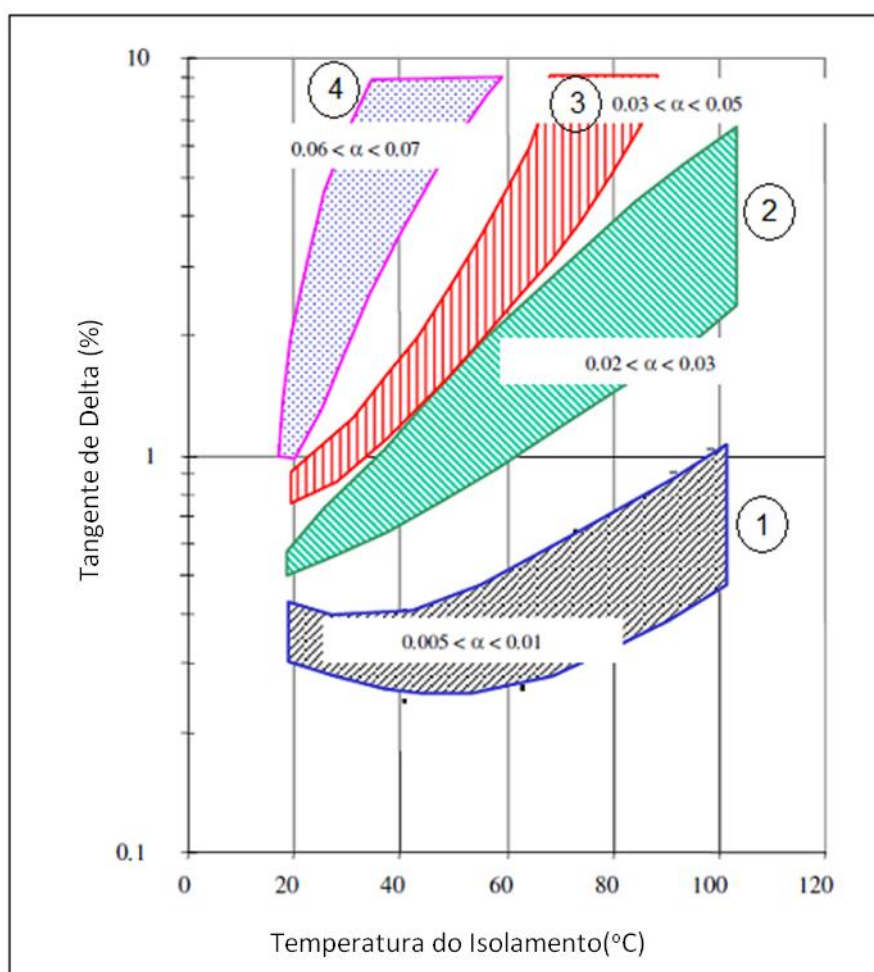


Figura 17 - Relação entre $tg\delta$ e Temperatura do Isolamento de TCs [17]

Tabela 7 - Diagnóstico das condições de isolamento a partir dos valores encontrados para o coeficiente de temperatura de TCs isolados a papel-óleo [17]

Area	α	Condições do Isolamento
1	$0,005 < \alpha < 0,01$	Isolamento em boas condições
2	$0,02 < \alpha < 0,03$	Isolamento afetado por contaminação
3	$0,03 < \alpha < 0,05$	Isolamento afetado por elevada absorção de água (2-5% em relação ao peso)
4	$0,06 < \alpha < 0,07$	Isolamento afetado por descargas parciais e pontos quentes

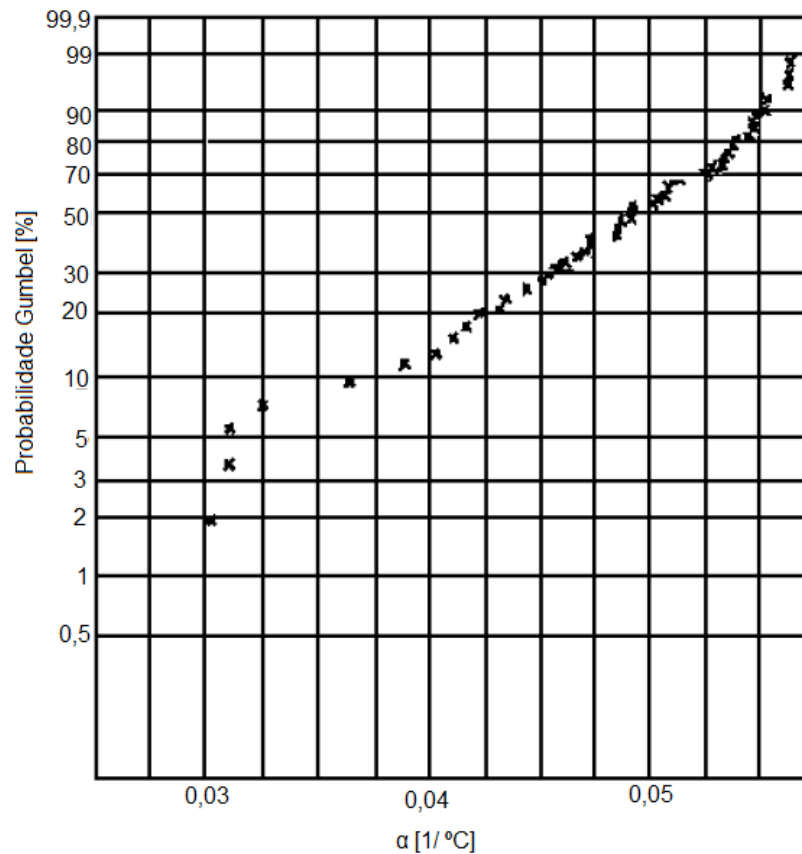


Figura 18 - Distribuição de Gumbel para o coeficiente α de 40 TCs com elevado teor de água no isolamento [17]

3.6.2 – TENSÃO CRÍTICA DE RUPTURA TÉRMICA DO ISOLAMENTO

Um processo de instabilidade térmica pode ocorrer se o valor da tensão aplicada continuamente ao isolamento do TC exceder a um determinado valor denominado tensão crítica de ruptura térmica do isolamento, U_{cr} .

De acordo com [1], para que o transformador de corrente seja termicamente estável é necessário que a tensão crítica de ruptura térmica seja igual ou superior a 120% da tensão máxima de operação, ou seja

$$U_{cr} \geq 1,2 \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

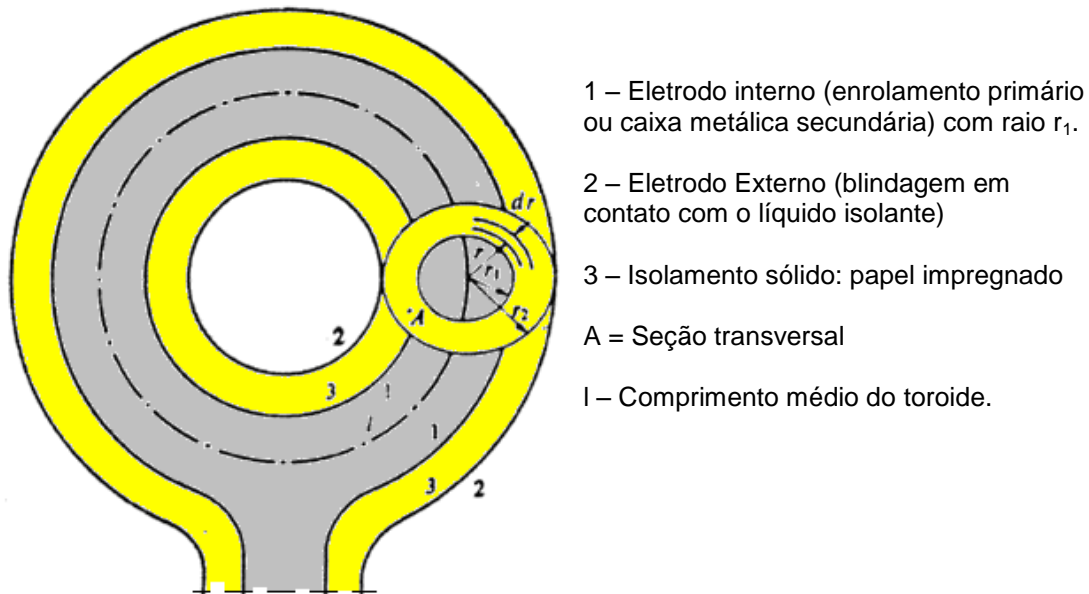


Figura 19 - Representação do Isolamento Sólido entre Primário e Secundário de um TC [1]

Considerando o isolamento sólido entre primário e secundário como um cilindro, formado a partir do toróide como mostra a *figura 19*, e, aplicando-se as equações de equilíbrio de calor e continuidade dielétrica pode-se chegar, de acordo com [1], à seguinte equação geral para determinação da tensão crítica de ruptura térmica.

$$U_{cr} = \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha \cdot P_{01}}} \cdot \frac{K \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\cosh\left(\operatorname{arctgh}\left(\frac{\rho}{K}\right) + \frac{K}{\sqrt{2}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right)} \quad (19)$$

Onde

α : Coeficiente de temperatura do isolamento em [1/°C]

λ : Condutividade térmica do isolamento em [W/cm.°C]

P_{01} : Perda dielétrica específica em [W/cm³ / (kV/cm)²]

r_1 e r_2 : Raios interno e externo do isolamento sólido

ρ : Parâmetro calculado a partir da expressão: $\rho = \frac{\alpha \cdot P_1 \cdot r_1}{\lambda \sqrt{2}}$ (20)

P_1 : Dissipação de calor na superfície de r_1 em [W/cm²]

K: Constante determinada a partir dos valores de ρ e F, conforme gráfico apresentado na *figura 20*.

F: Parâmetro dimensional calculado a partir da expressão $F = \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$ (21)

A figura 20 apresenta a constante K em função de F e ρ .

A perda dielétrica específica P_{01} , exprime o valor das perdas por unidade de volume [cm^3], e por unidade de esforço elétrico [kV/cm], para uma dada temperatura e à frequência nominal.

A partir da definição de $\text{tg}\delta$, temos que

$$\text{tg}\delta = \frac{I_w}{I_c} \quad (22)$$

Onde

I_w : componente ativa da corrente, $I_w = P_{01} \cdot E \cdot 10^{-3}$, sendo E em [kV/cm]

I_c : componente não ativa da corrente (de caráter capacitivo),

$I_c = 2\pi f \cdot E \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot 10^3$, sendo E em [kV/cm]

Dessa forma, de acordo com [1], tem-se

$$P_{01} = f \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot \frac{1}{1,8} \cdot 10^{-6} \left[\frac{W}{\text{cm}^3} / \left(\frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right)^2 \right] \quad (23)$$

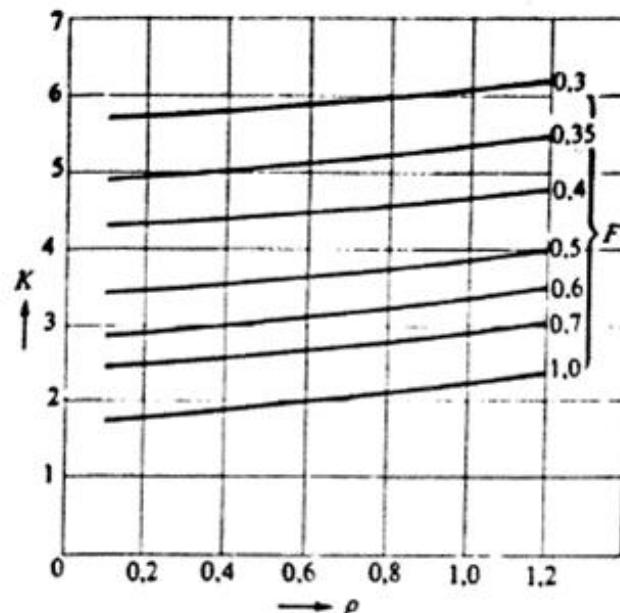


Figura 20 - Determinação da Constante K a partir dos valores de F e ρ [1].

Para o caso particular em que o calor gerado pelo eletrodo interno se dissipa diretamente para o óleo, não sendo transferido através do isolamento sólido, temos que $P_1 = 0$ e $\rho = 0$.

Neste caso, a tensão crítica é calculada, conforme [1], como segue:

$$U_{cr} = 0,9373 \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha \cdot P_{01}}} \quad (24)$$

Este caso aplica-se aos TCs tipo tanque morto.

Ressalta-se que nesta situação, a tensão crítica depende apenas das propriedades do meio dielétrico, ou seja α , λ , ε e $\text{tg}\delta$, não sendo afetada pela forma e tamanho do dielétrico sólido.

Para os TCs tipo invertido, ou tanque vivo, o calor gerado pelas perdas no eletrodo interno (enrolamentos secundários dentro da caixa metálica) é transferido através do isolamento sólido. Dessa forma, $P_1 \neq 0$ e $\rho \neq 0$.

Da equação (19), temos que a tensão crítica diminui com o aumento das perdas P_1 e com o aumento da espessura do isolamento expressa através da relação r_2/r_1 .

Para este caso, de acordo com [1], tem-se:

$$U_{cr} = \sigma \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha \cdot P_{01}}} \quad (25)$$

Sendo σ obtido a partir de F e ρ a partir do gráfico da figura 21.

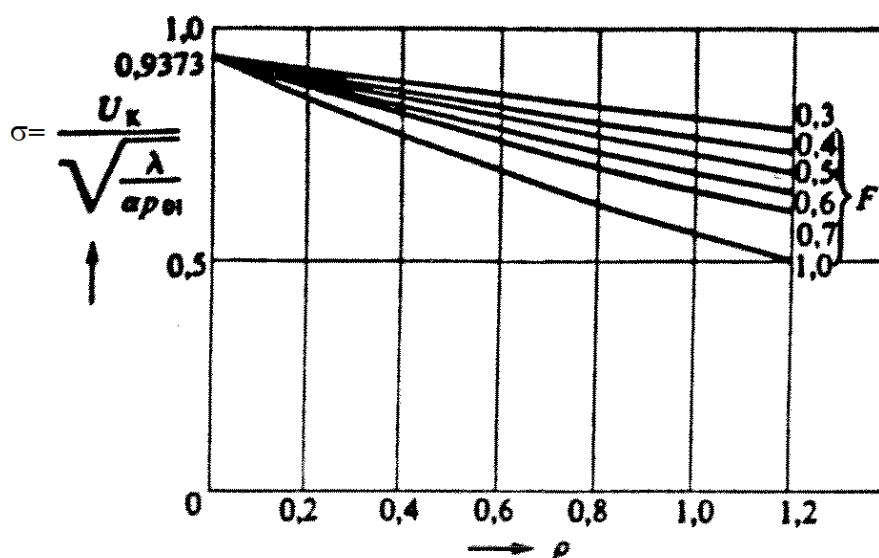


Figura 21 - Determinação da Constante σ a partir dos valores de F e ρ [1.]

Capítulo 4

MÉTODOS DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Este capítulo apresenta os métodos existentes para avaliação do desempenho térmico do transformador de corrente de acordo com as principais normas vigentes, bem como, métodos que estão em discussão algumas importantes entidades de normalização e métodos alternativos propostos pelo CIGRÉ [17].

A *tabela 8* apresenta as principais normas vigentes para transformadores de corrente, bem como, os projetos de norma em elaboração. Estão relacionadas apenas as normas relevantes para a avaliação do desempenho térmico.

Tabela 8 - Principais Normas Vigentes para Transformadores de Corrente para Avaliação do Desempenho Térmico

Entidades	Normas Vigentes	Normas em Elaboração
ABNT	NBR-6856/1992: “Transformador de Corrente – Especificação” [4] NBR-6821/1992: “Transformador de Corrente – Método de Ensaio” [7]	Revisão da Norma NBR-6856 englobando Especificação e Métodos de Ensaio em uma única norma. A norma NBR-6821 será obsoleta.
IEC	IEC 60044-1 Ed. 1.2 2003-02 “Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers” [8] IEC 61869-1 Ed. 1.0 2007-10 “Instrument Transformers – Part 1 General requirements” [5]	Elaboração da Norma IEC 61869-2 “Instrument Transformers – Part 2: Specific requirements for current transformers” [21]
IEEE	IEEE C57.13/2008 “IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers” [6] IEEE C57.13.5/2009 “IEEE Standard for Performance and Test Requirements for Instrument Transformers of a Nominal System Voltage of 115 kV and Above” [22]	Não constam documentos de revisões ou elaborações em andamento para transformadores de instrumentos.

4.1 – ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

As principais normas vigentes estabelecem para a avaliação do desempenho térmico dos transformadores de corrente o ensaio de tipo de elevação de temperatura.

Este ensaio, de acordo com os procedimentos ora válidos, consiste na aplicação ao primário da corrente nominal multiplicada pelo fator térmico, à frequência nominal, tendo os enrolamentos secundários conectados à sua carga nominal.

As temperaturas dos enrolamentos secundários são monitoradas através do método da variação da resistência. Este método consiste no cálculo da temperatura do enrolamento considerando a variação da resistividade dos condutores utilizados com a temperatura.

A temperatura de um enrolamento em um determinado instante do ensaio é calculada através da equação 26.

$$\theta_t = \left(\frac{R_t}{R_0} \right) \cdot \theta_0 + T \quad (26)$$

Onde

R_t : Resistência ôhmica medida em um instante t do ensaio, ou logo após o desligamento, em $[\Omega]$.

R_0 : Resistência ôhmica medida à temperatura de referência θ_0 , normalmente medida no início do ensaio, antes da energização, em $[\Omega]$.

θ_t : Temperatura do enrolamento relacionada à resistência R_t .

T : Constante térmica do material do condutor, sendo seu valor igual a 234,5 para o cobre e 225 para o alumínio.

As temperaturas dos terminais primários, tanque e topo do óleo podem ser obtidas através de termômetros, termopares ou sensores de fibra ótica.

A temperatura ambiente é determinada como a média entre, pelo menos 3 termômetros ou termopares instalados ao redor do TC sob ensaio.

A elevação de temperatura $\Delta\theta$ é definida como a diferença entre a temperatura do ponto estudado θ_t e a temperatura ambiente no instante da medição.

$$\Delta\theta = \theta_t - \theta_{amb} \quad (27)$$

O TC deve permanecer energizado até que se tenha atingido a estabilização, cujos critérios são apresentados, para cada norma, na tabela 9.

Norma	Crítérios de Estabilização
NBR-6856/1992 [4] e NBR-6821/1992 [7]	Variação da Elevação de Temperatura deve ser inferior a 2,5% ou 1°C/hora, o que for maior, durante 3 horas consecutivas
IEC 60044-1/Ed. 1.2 2003-02 [8] IEC 61869-1 Ed. 1.0 2007-10 [5]	Variação da Elevação de Temperatura não exceder a 1K/hora
IEEE C57.13/2008 [6] e IEEE C57.13.5/2009 [22]	a) Duração do ensaio atinja 5 vezes a constante de tempo térmica do TC. ou b) A diferença entre 2 medições consecutivas de elevação de temperatura não exceda 1°C, considerando-se que o intervalo entre medições deve ser de 4 horas.

Tabela 9 - Crítérios de Estabilização de Acordo com Principais Normas Vigentes

A tabela 10 apresenta, para cada norma, os valores limites de elevação de temperatura para TC selado e isolado a papel-óleo.

Norma	Máximos Valores Admissíveis para Elevação de Temperatura
NBR-6856/1992 [4] e NBR-6821/1992 [7]	Para os enrolamentos: Elevação de Temperatura média: 55 °C Elevação de temperatura para o ponto mais quente: 65 °C Para o topo do óleo: 55 °C
IEC 60044-1/Ed. 1.2 2003-02 [8] e IEC 61869-1 Ed. 1.0 2007-10 [5]	Para os enrolamentos: 65K Para o topo do óleo: 55K
IEEE C57.13/2008 [6] e IEEE C57.13.5/2009 [22]	a) Para temperatura ambiente de 30 °C: Elevação de temperatura média para o enrolamento: 65 °C Ponto mais quente do enrolamento: 80 °C b) Para temperatura ambiente de 55 °C: Elevação de temperatura média para o enrolamento: 40 °C Ponto mais quente do enrolamento: 55°C

Tabela 10 - Valores Máximos Permitidos para Elevação de Temperatura de Acordo com Principais Normas Vigentes

4.1.1 – ASPECTOS PARTICULARES DAS NORMAS IEC

A norma IEC 60044-1[8] apresenta as seguintes particularidades em relação ao procedimento comum apresentado anteriormente.

- a) O fator de potência estabelecido para as cargas de ensaio é unitário.

- b) A temperatura ambiente durante o ensaio deve estar entre 10°C e 30°C.
- c) Se a temperatura ambiente especificada para operação exceder a 40°C, os máximos valores estabelecidos para a elevação de temperatura, apresentados neste trabalho na tabela 10, devem ser reduzidos na mesma quantidade em que a temperatura ambiente de operação exceder a 40°C.
- d) Se o TC é especificado para operar a altitude superior a 1000m acima do nível do mar, e o ensaio é realizado abaixo de 1000m, os valores máximos admissíveis devem ser reduzidos em 0,4% para cada 100m em que a altitude de operação exceder a 1000m.

4.1.2 – ASPECTOS PARTICULARES DAS NORMAS IEEE

As normas IEEE C57.13/2008 [6] e IEEE C57.13.5/2009 [22] apresentam as seguintes particularidades em relação ao procedimento comum apresentando inicialmente.

- a) O método preferencial para a determinação da temperatura ambiente é através da utilização de um TC idêntico ou de constante de tempo térmica similar, utilizando o método da variação da resistência.
- b) Deve ser determinada a temperatura do enrolamento no instante do desligamento, o que pode ser feito através de uma curva contendo os valores de resistência medidos em função do tempo de desligamento. Pelo menos 4 pontos devem ser medidos, em intervalos inferiores a 3 minutos, e a curva deve ser extrapolada até o instante do desligamento.
- c) O ensaio deve ser feito a uma temperatura ambiente entre 10°C e 40°C, sendo os critérios de aprovação válidos para temperatura ambiente de 30°C. Se ao final do ensaio os valores obtidos estiverem muito próximos aos limites estabelecidos, a elevação de temperatura final obtida no ensaio deve ser corrigida para a temperatura de 30°C, multiplicando-se seu valor por um fator de correção calculado através das seguintes expressões.

$$F_c = \frac{264,5}{234,5 + \theta_f} \quad (28) \text{ para enrolamentos de cobre ou}$$

$$F_c = \frac{255}{225 + \theta_f} \quad (29) \text{ para enrolamentos e alumínio}$$

sendo θ_f , a temperatura ambiente no final do ensaio.

- d) Se o ensaio for realizado à altitude maior do que 1000m acima do nível do mar, sendo o TC especificado para operar em altitudes de até 1000m, a elevação de temperatura obtida no final do ensaio deve ser corrigida através da expressão a seguir, conforme [6].

$$\theta_r = \theta_m \cdot \left(1 - 0,005 \cdot \frac{h - 1000}{1000} \right) \quad (30)$$

Onde

θ_r : elevação de temperatura corrigida para as condições normalizadas de altitude, em [°C]

θ_m : elevação de temperatura corrigida para a temperatura ambiente de 30°C, em [°C]

h: altitude acima do nível do mar, em [m], do laboratório de ensaios.

- e) Quanto às condições de carregamento, o enrolamento de medição pode ser curto-circuitado. Os enrolamentos de proteção devem ser conectados à sua carga nominal, porém, com qualquer fator de potência.
- f) Se o fator térmico especificado é maior do que 1, o ensaio pode ser feito com a corrente nominal. Neste caso, a expressão a seguir deve ser utilizada para corrigir a elevação de temperatura obtida para a condição de corrente nominal multiplicada pelo fator térmico, conforme [22].

$$\theta_{Ft} = \theta_{ensaio} \cdot \left(\frac{I_{Ft}}{I_{ensaio}} \right)^n \quad (31)$$

Onde

θ_{Ft} : elevação de temperatura com a corrente primária nominal multiplicada pelo fator térmico I_{Ft} .

θ_{ensaio} : elevação de temperatura de temperatura obtida no ensaio realizado com a corrente I_{ensaio} .

n: expoente assumido como igual a 2, de forma conservadora.

- g) A consideração das perdas dielétricas é feita de acordo com o seguinte critério. Deve-se medir o valor das perdas dielétricas à tensão $U_m/\sqrt{3}$ e compará-lo com o valor das perdas nos enrolamentos, considerando a circulação da corrente nominal multiplicada pelo fator térmico nos enrolamentos primário e secundário, com as resistências medidas referenciadas a 85°C. Apenas a resistência primária pode ser determinada

através de cálculo. Se as perdas dielétricas excederem a 20% das perdas nos enrolamentos, o ensaio deve ser feito com aplicação simultânea de tensão e corrente. A tensão aplicada deve ser $U_m/\sqrt{3}$.

- h) Para o caso de realizar o ensaio com aplicação simultânea de tensão e corrente, o ensaio pode ser realizado cortocircuitando-se os terminais primários e alimentando o TC através do(s) secundário(s). Neste caso, a corrente primária deve ser verificada através de um dispositivo adequado.
- i) Se as perdas dielétricas não excederem a 20% das perdas nos enrolamentos, o ensaio pode ser realizado apenas com aplicação da corrente, e o valor final obtido, de acordo com [22], deve ser corrigido através da seguinte expressão:

$$\theta_{rpd} = \theta_{ensaio} \cdot \left(1 + \frac{P_{diel}}{P_{I2R}} \right) \quad (32)$$

Onde

θ_{rpd} : elevação de temperatura corrigida para considerar as perdas dielétricas

θ_{ensaio} : elevação de temperatura de temperatura obtida no ensaio realizado somente com aplicação de corrente.

P_{diel} : perdas dielétricas medidas a $U_m/\sqrt{3}$.

P_{I2R} : perdas totais nos enrolamentos corrigidas a 85°C

- j) Com o fim de evitar-se que os barramentos ou cabos tornem-se uma fonte ou um dissipador de calor, influenciando nos resultados, os condutores devem ser dimensionados adequadamente para corrente de ensaio. O comprimento mínimo dos mesmos deve ser 1m e a diferença entre sua temperatura medida a 1 m dos terminais primários e a temperatura dos terminais primários deve estar dentro de $\pm 5^\circ\text{C}$.

4.1.3 – ASPECTOS PARTICULARES DAS NORMAS ABNT

As normas NBR-6856/1992 [4] e NBR-6821/1992 [7] apresentam as seguintes particularidades em relação ao procedimento comum apresentando inicialmente.

- a) A temperatura ambiente de ensaio deve estar compreendida entre 10°C e 40°C. Para realização de ensaio fora dessa faixa é necessário que haja acordo e que se conheçam os fatores de correção aplicáveis.
- b) Podem ser utilizadas cargas de qualquer fator de potência, desde que o valor da potência aparente para a corrente nominal não seja alterado

- c) Para determinação da temperatura do enrolamento no instante do desligamento, deve-se traçar uma curva com os valores de resistência em função do tempo após desligamento e extrapolar esta curva até o tempo inicial. Se os valores de elevação de temperatura não estiverem próximos aos limites máximos estabelecidos, pode-se considerar uma correção de 1°C por minuto após o desligamento.

4.2 – MEDIÇÃO DO FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS DO ISOLAMENTO

A medição do fator de perdas dielétricas é estabelecida pelas principais normas apenas à temperatura ambiente, para tensões compreendidas entre 10 kV e $U_m/\sqrt{3}$.

As normas ABNT [4] e [7] e a norma IEEE C57.13.5 [22] classificam esta medição como ensaio de rotina. Para a norma IEC [8] a medição do fator de perdas dielétricas é classificada como ensaio especial.

Os valor máximo permitido para as normas ABNT é de 1% [4]. Para as normas IEEE [22] e IEC [7], o fator de perdas dielétricas não deve exceder a 0,5%.

Um documento do CIGRÉ [17] sobre o estado da arte em transformadores de medida sugere o limite de 0,4% para TCs isolados a papel-óleo.

4.3 – ENSAIO DE ESTABILIDADE TÉRMICA

O ensaio de estabilidade térmica em um TC consiste na aplicação simultânea de alta tensão entre primário e terra e corrente nominal multiplicada pelo fator térmico ao enrolamento primário.

Além das temperaturas, cuja medição é feita de forma similar ao ensaio de elevação de temperatura, também são realizadas medições do fator de perdas dielétricas durante o ensaio.

Os critérios para a estabilização devem envolver tanto as medições de temperaturas, quanto o valor da tangente de delta.

Este ensaio não está estabelecido em nenhuma das normas vigentes, exceto a norma IEEE C57.13.5/2009 [22] que especifica o ensaio de elevação de temperatura realizado com aplicação simultânea de tensão e corrente quando o valor das perdas dielétricas, medidas à temperatura ambiente e à tensão $U_m/\sqrt{3}$ excede o valor de 20% do das perdas totais nos enrolamentos referenciadas a 85°C.

Porém, nada está especificado com relação a medição do fator de perdas dielétricas durante ou ao final do ensaio.

Um procedimento utilizado como referência em atividades de pesquisa, avaliação de peças que já estiveram em operação, e que também é requerido em algumas especificações técnicas de usuários, tais como a CHESF no Brasil [23], sugere a aplicação de tensão de $1,1x U_m/\sqrt{3}$ e corrente nominal multiplicada pelo fator térmico à temperatura ambiente de 40°C.

De acordo com este procedimento [23], o TC deve permanecer energizado nestas condições até que o mesmo atinja a estabilidade térmica ou até que ocorra a falha do isolamento.

O TC é considerado termicamente estável quando a elevação de temperatura dos enrolamentos não exceder a 1°C e os valores de tangente de delta medidos às tensões correspondentes a $0,3x U_m/\sqrt{3}$ e a $1,1x U_m/\sqrt{3}$ não variarem mais do que 0,04% (ou 0,0004) em um período de 12 horas.

Os critérios de aprovação, de acordo com este método [23] são:

- As temperaturas nos enrolamentos não devem elevar-se mais do que 10°C em relação ao ensaio de elevação de temperatura, realizado apenas com aplicação de corrente;

- O valor final da tangente de delta não deve exceder a 1,5 vezes o valor no início do ensaio;

- Os valores de descargas parciais e tangente de delta à temperatura ambiente, após o resfriamento do TC não devem ser significativamente diferentes dos valores medidos antes do ensaio;

- A análise de gases dissolvidos no óleo, antes e após o ensaio de estabilidade térmica, não deve apresentar evolução significativa dos gases.

A especificação técnica da CHESF [23] dispensa a realização deste ensaio, caso os resultados de um outro ensaio, a determinação do coeficiente de temperatura da tangente de delta, apresente resultados satisfatórios.

Este ensaio será descrito a seguir.

4.4 – ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TANGENTE DE DELTA

A medição do fator de perdas dielétricas se constitui em um importante instrumento de avaliação do isolamento. Como visto anteriormente, as normas apenas

especificam medições à temperatura ambiente, e as tensões de ensaio não são claramente definidas.

A medição da tangente de delta à temperatura ambiente e à alta temperatura para obtenção do coeficiente de temperatura α é sugerida como ensaio de tipo pelo CIGRÈ [17], e tem sido utilizada para avaliação de equipamentos que já estiverem em operação, além de constar de algumas especificações técnicas de usuários tais como a CHESF [23] no Brasil e a ESKOM [24] na África do Sul.

O ensaio consiste na medição da tangente de delta à temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) e a alta temperatura ($85^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) e do cálculo do coeficiente α , conforme a equação 16.

As medições são normalmente são feitas a 10 kV e a $U_m/\sqrt{3}$, porém algumas especificações solicitam a medição em várias tensões desde 10 kV até $1,2 \cdot U_m/\sqrt{3}$.

O critério de aprovação está relacionado aos estudos apresentados em 3.6.1. e são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Valores normalmente adotados como critérios de aprovação para o ensaio de determinação do coeficiente de temperatura α .

Valor de α obtido no ensaio	Resultado
$\alpha \leq 0,01$	O TC está aprovado. O resultado indica que o TC é termicamente estável.
$0,01 < \alpha \leq 0,03$	O TC deve ser submetido ao ensaio de estabilidade térmica. O resultado indica possibilidade de instabilidade térmica.
$\alpha > 0,03$	O TC está reprovado. O resultado indica que o mesmo é termicamente instável.

4.5 – DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE TEMPO TÉRMICA DE UM TC

A constante de tempo térmica de um TC pode ser determinada a partir dos resultados de um ensaio de elevação de temperatura.

A partir das medições de elevação de temperatura de um TC, obtidas durante a realização do ensaio, obtém-se uma curva da mesma em função da duração do ensaio.

A curva obtida corresponde a uma relação do tipo:

$$\theta(t) = \theta_F \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (33)$$

Onde

$\theta(t)$ = Elevação de Temperatura em função do tempo de ensaio t

θ_F = Elevação de Temperatura Final ou Elevação de Temperatura Máxima

τ = Constante de tempo térmica

Da equação (33), tem-se que:

$$\theta(\tau) = 0,632 \cdot \theta_F \quad (34)$$

$$\theta(3\tau) = 0,95 \cdot \theta_F \quad (35)$$

Dessa forma, a constante de tempo corresponde ao tempo de ensaio correspondente ao instante em que a elevação de temperatura atinge cerca de 63% do valor da elevação de temperatura final.

A figura 22 ilustra a curva de elevação de temperatura x tempo de ensaio, evidenciando o ponto correspondente à duração de 1 constante de tempo térmica.

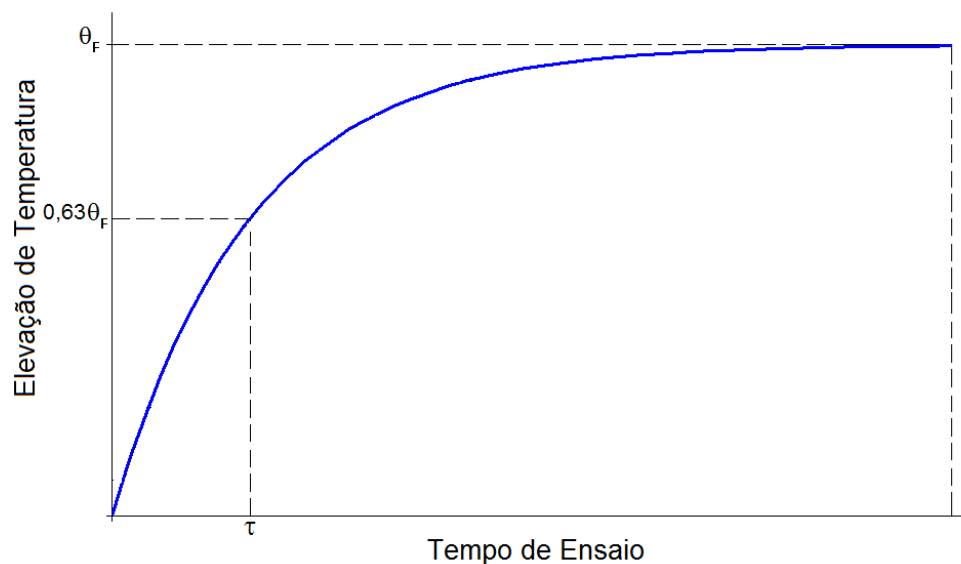


Figura 22 – Curva “Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio” e Determinação da constante de tempo térmica de um TC

Capítulo 5

RESULTADOS E AVALIAÇÃO DE ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA E EXTRA-ALTA TENSÃO

Este capítulo apresenta resultados de ensaios realizados em TCs de alta e extra-alta tensão para avaliação de seu desempenho térmico, como também, discute os métodos utilizados e os resultados obtidos.

Ao final do capítulo, ressaltam-se as particularidades do TC de extra-alta tensão, apontando para a necessidade de uma tratativa diferenciada em relação ao TC de alta tensão.

As características principais de cada TC submetido aos ensaios são apresentadas na tabela 12.

Tabela 12 - Principais características das Amostras Submetidas a Ensaios.

Amostra	Correntes Nominais	Núcleos Medição	Núcleos Proteção	Fator Térmico	Classe de Tensão
01	3000/2000/1000/500-1-1-1-1-1 A	1	4	1,2	800 kV
02	3000/2000/1000/500-1-1-1-1-1 A	1	4	1,2(*)	800 kV
03	300x600x1200-5-5-5-5-5 A	1	4	1,2	245 kV
04	300x600x1200-5-5-5-5-5 A	1	3	1,2	145 kV

5.1 – ENSAIOS ESPECIAIS DE ESTABILIDADE TÉRMICA PARA AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS PERDAS DIELÉTRICAS NA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA TOTAL DO TC

Visando evidenciar a influência das perdas dielétricas na elevação de temperatura total do TC, adotou-se um procedimento diferenciado para o ensaio de estabilidade térmica.

O ensaio foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consiste na aplicação apenas de corrente aos enrolamentos do TC e a segunda etapa, na aplicação simultânea de tensão e corrente.

O TC sob ensaio foi energizado aplicando-se corrente aos enrolamentos de proteção conectados em série, com o primário curto-circuitado e o enrolamento de medição conectado a um amperímetro para medição da corrente primária.

A figura 23 apresenta o circuito de ensaio.

Em cada uma das etapas, o TC permaneceu energizado até atingir a estabilização. O critério de estabilização utilizado foi a duração de, pelo menos, 3 vezes a constante de tempo térmica do TC.

Os valores aplicados de corrente e tensão foram: corrente nominal multiplicada pelo fator térmico e tensão correspondente a $U_m/\sqrt{3}$.

As temperaturas dos enrolamentos foram determinadas pelo método da variação da resistência. As temperaturas dos terminais primários e outras partes externas foram medidas através de sensores de fibra ótica, os quais permitem a medição mesmo durante a etapa de aplicação de alta tensão.

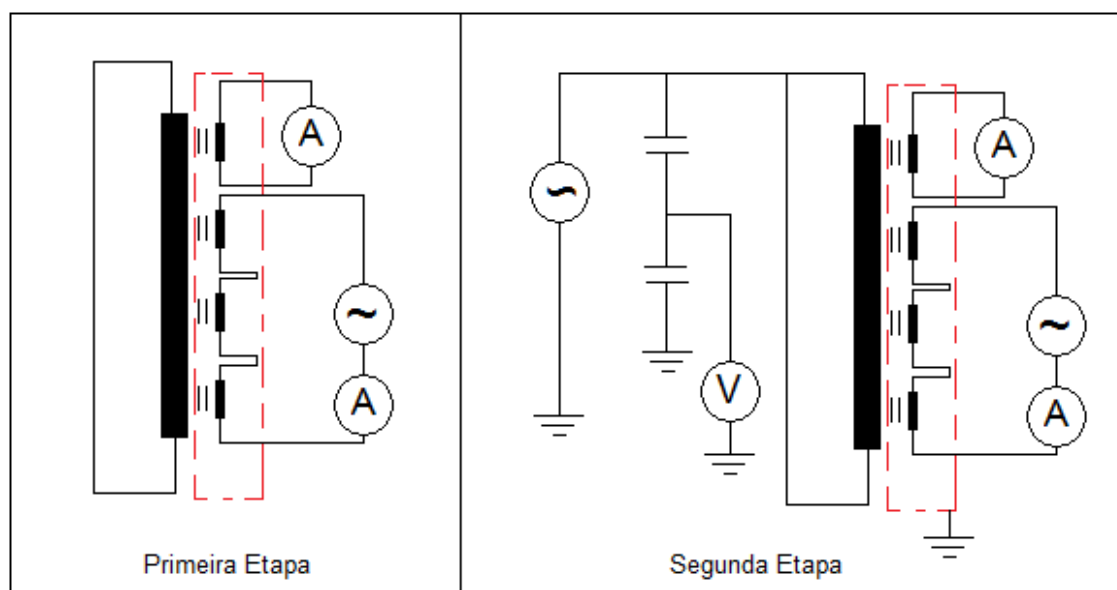


Figura 23 - Circuito de Ensaio – Estabilidade Térmica

A temperatura ambiente utilizada para o cálculo da elevação de temperatura foi obtida através da medição da resistência de um enrolamento de um TC idêntico ao objeto sob ensaio, colocado dentro da área de ensaio próximo ao TC sob ensaio.

Alguns cuidados especiais devem ser tomados quando se realiza o ensaio com alimentação de corrente pelos secundários e terminais primários curto-circuitados.

O primeiro cuidado refere-se às conexões utilizadas entre os terminais primários curto-circuitados. Quando se alimenta o secundário de um TC com o primário curto-circuitado, a impedância primária é vista pelo secundário multiplicada pelo quadrado da relação do TC.

Dessa forma, a impedância primária definirá a indução de trabalho do núcleo secundário durante o ensaio.

A figura 24 apresenta um arranjo primário utilizado para estes ensaios, distribuindo-se os condutores primários de forma a minimizar a impedância de conexão de curto-circuito.

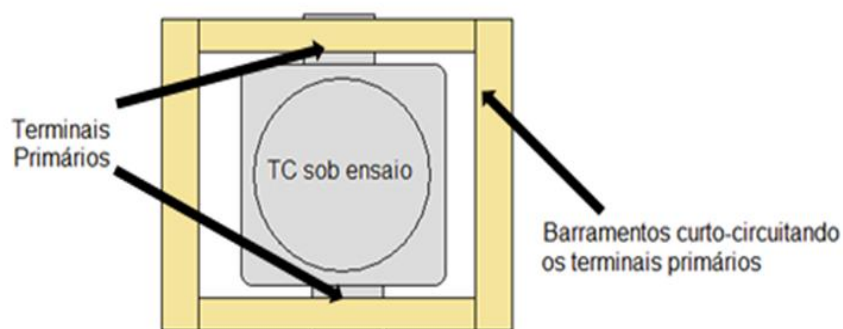


Figura 24 - Arranjo para conexão entre terminais primários

Em alguns casos, pode não ser possível a realização deste ensaio com energização através dos secundários. Isso ocorre quando existe uma combinação desfavorável de características tais como uma elevada relação de transformação e núcleos secundários com tensão de saturação relativamente baixa.

Um exemplo prático foi verificado durante este trabalho quando se tentou executar este ensaio em um TC com relação de transformação 4000:1 e cujos núcleos secundários de proteção possuíam tensão de saturação em torno de 500 V. Ao atingir-se tensões da ordem de 500 V entre os terminais dos enrolamentos secundários, os núcleos foram saturados impossibilitando atingir-se a corrente primária de ensaio especificada.

Neste caso, verificou-se que, embora a corrente circulando através dos núcleos de proteção conectados em série tivesse atingido o valor correspondente ao da corrente secundária nominal multiplicada pelo fator térmico, a corrente primária não excedia a metade da corrente primária nominal.

Outro cuidado refere-se à medição da corrente primária. Considerando o problema de saturação discutido nos parágrafos anteriores, não se deve utilizar a medição da corrente de alimentação como referência de medição da corrente primária.

Um TC de alta ou extra-alta tensão é formado por enrolamentos secundários construídos sobre núcleos magnéticos independentes uns dos outros. As dimensões e características de cada núcleo diferem em função de sua aplicação.

Os núcleos destinados a serviços de medição são caracterizados pelo uso de materiais magnéticos especiais que garantem erros de relação e defasagem angular muito baixos, mas que também saturam em níveis mais baixos de indução.

Os núcleos destinados a serviços de proteção são caracterizados por indução de saturação mais elevada, de forma a garantir a correta representação nos enrolamentos secundários das correntes de falta que circulam pelo primário.

Dentro deste contexto, os núcleos de medição são inadequados para serem alimentados pela corrente de ensaio. Dessa forma, recomenda-se alimentar os núcleos de proteção com a corrente de ensaio, e utilizar o núcleo de medição para a medição da corrente de ensaio.

A medição da corrente de ensaio também pode ser feita por outro TC de classe de tensão compatível com a tensão de ensaio. Porém, o uso de um outro TC contribui para uma maior impedância do circuito primário.

A figura 25 apresenta um gráfico com os valores de elevação de temperatura ao longo de um ensaio realizado em um TC classe 800 kV.

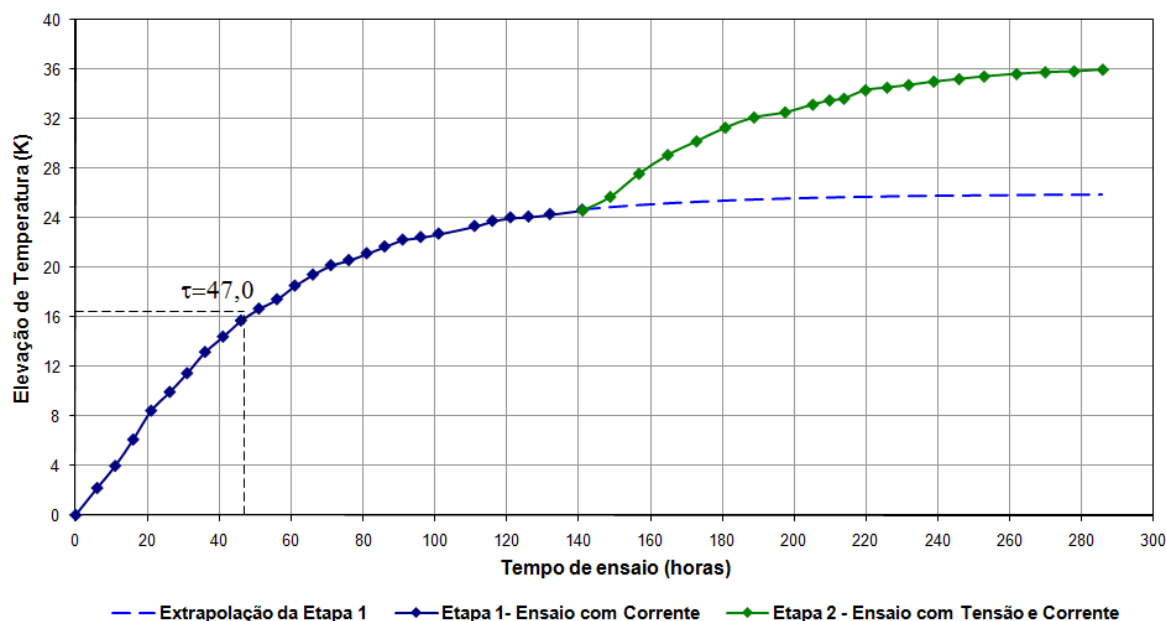


Figura 25 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 800 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica

A curva azul refere-se à primeira etapa do ensaio, realizada com aplicação de corrente, sem aplicação de tensão. A curva verde refere-se a segunda etapa, com aplicação simultânea de tensão e corrente.

A curva referente à primeira etapa foi extrapolada até o tempo final de ensaio. Comparando-se a curva da segunda etapa com a extrapolação da curva da primeira etapa temos um valor representativo da influência das perdas dielétricas na elevação de temperatura do TC sob ensaio.

Para este TC sob ensaio, a elevação de temperatura adicional devida à influência das perdas dielétricas foi de 10°C. A constante de tempo térmica determinada para o TC de 800 kV foi de 47 horas.

A figura 26 apresenta um gráfico com os valores de elevação de temperatura em função do tempo de ensaio para um TC de 245 kV. Para o TC de 245 kV temos uma constante de tempo térmica de 19 horas e um valor adicional de elevação de temperatura devida às perdas dielétricas de 2,9°C.

A figura 27 apresenta o gráfico referente a um TC de 145 kV. Para o TC de 145 kV temos uma constante de tempo térmica de 14 horas e um valor adicional de elevação de temperatura devida às perdas dielétricas de 1,3°C.

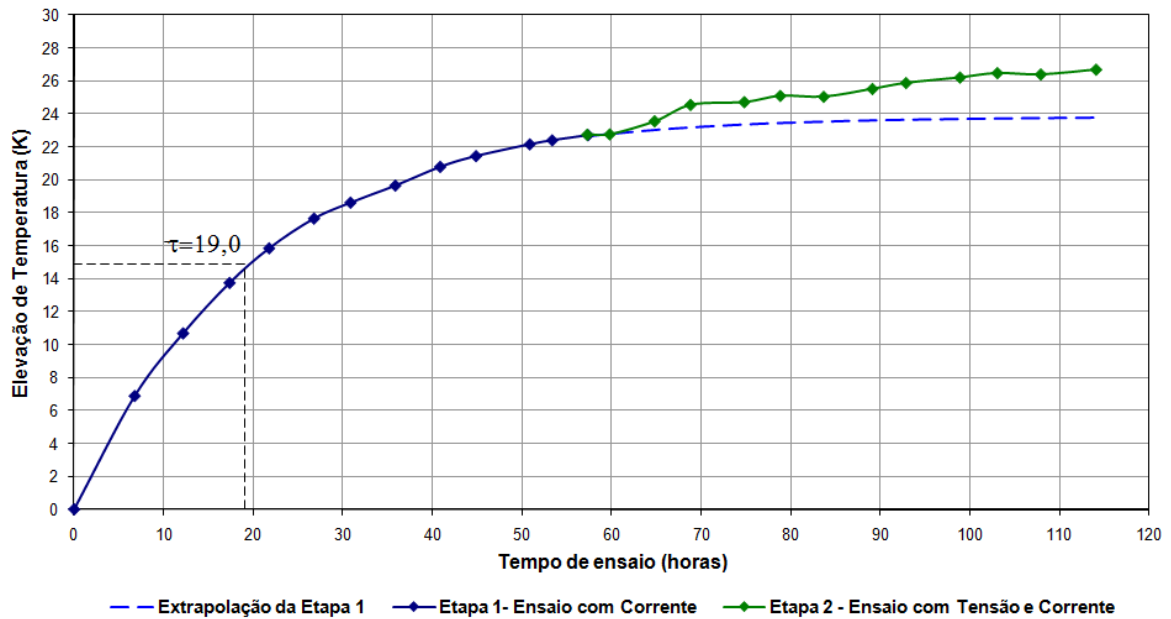


Figura 26 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 245 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica

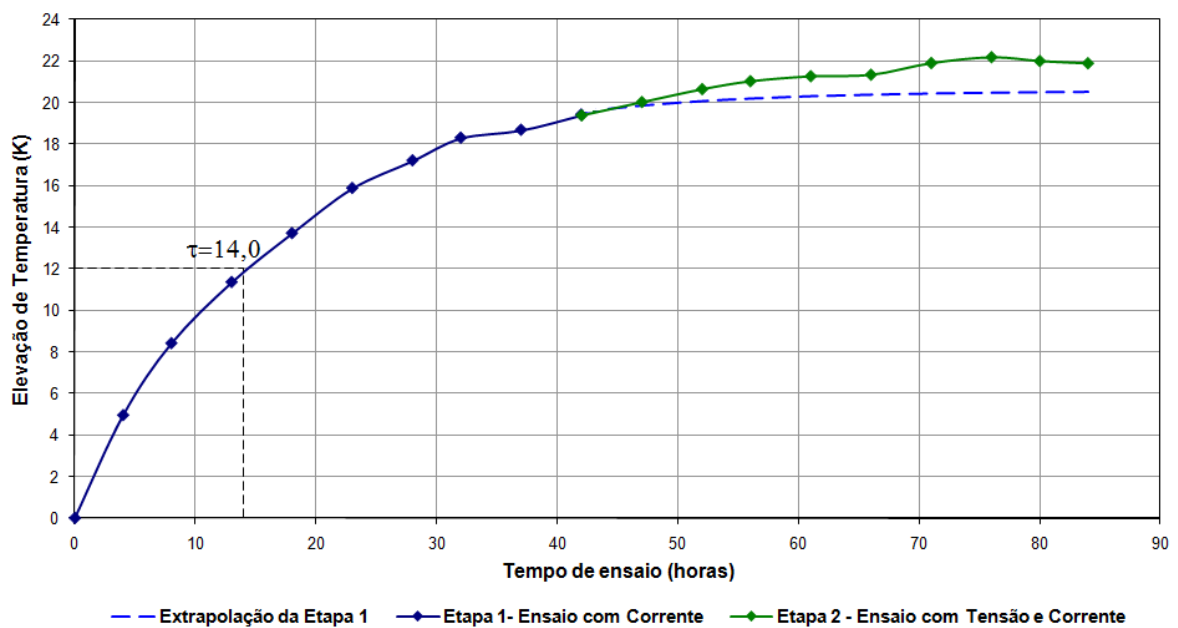


Figura 27 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 145 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica

A comparação destes resultados ressalta a relevância da contribuição das perdas dielétricas na elevação de temperatura para maiores classes de tensão.

A tabela 15 apresenta um resumo de diversos ensaios realizados em TCs com diferentes classes de tensão, bem como os valores de perdas nos enrolamentos e perdas dielétricas.

5.2 – ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TANGENTE DE DELTA

A *tabela 13* apresenta resultados de ensaios para determinação do coeficiente de temperatura para os mesmos TCs nos quais foram realizados os ensaios de estabilidade térmica.

A *figura 28* apresenta a variação da tangente de delta com a temperatura para os mesmos TCs que foram submetidos ao ensaio especial de estabilidade térmica. A *figura 29* apresenta a variação da tangente de delta com a tensão para o TC de 800 kV.

Tabela 13- Valores Obtidos para o Coeficiente de Temperatura α para os TCs sob ensaio

TC	Coeficiente α
145 kV	0,0054
245 kV	0,0050
800 kV	0,0060

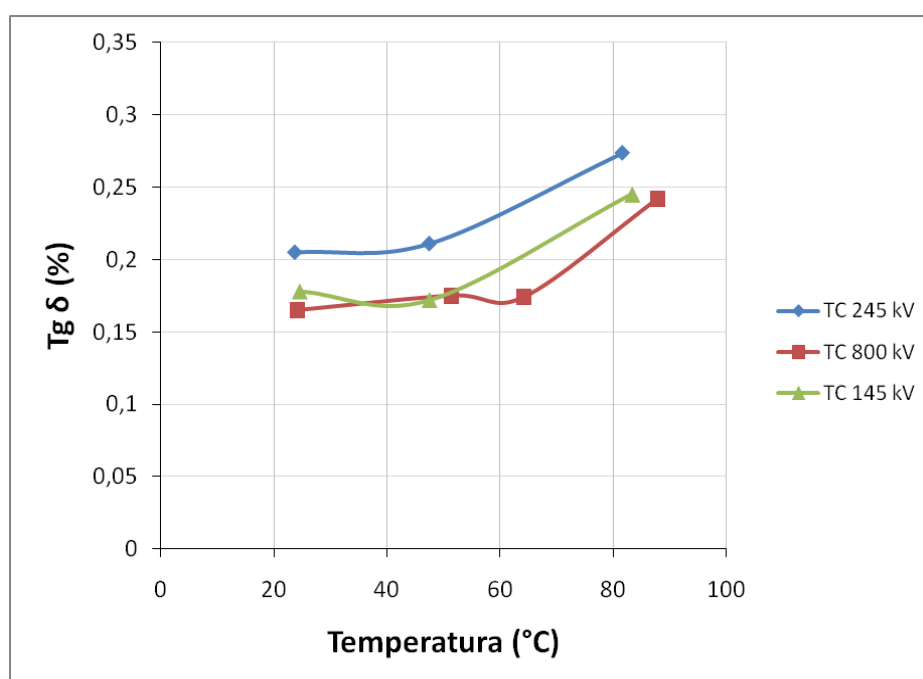


Figura 28 - Variação da Tangente de Delta com a Temperatura

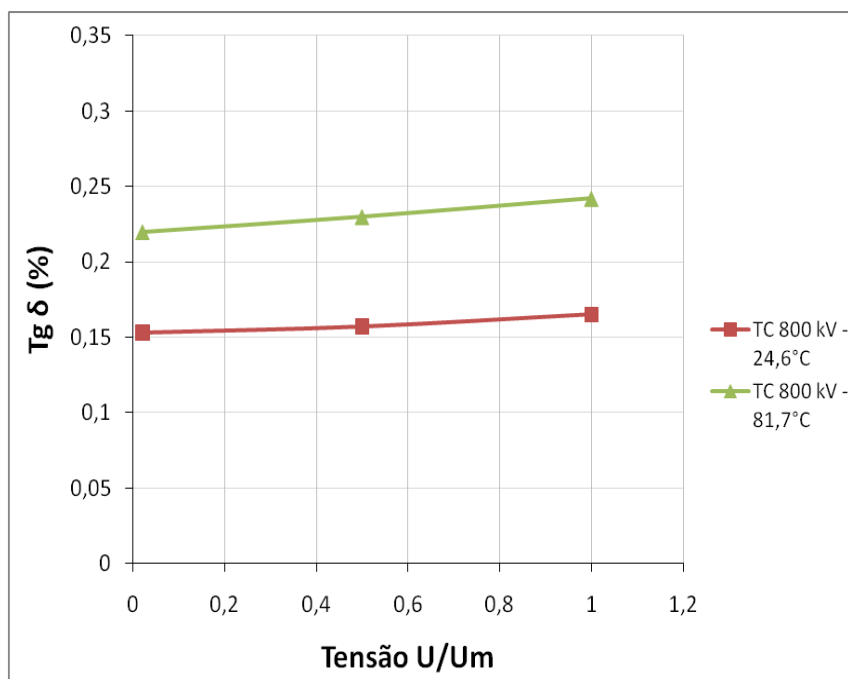


Figura 29 - Variação da Tangente de Delta com a Tensão para o TC de 800 kV

5.3 – ENSAIO DE ESTABILIDADE TÉRMICA REALIZADO COM FATOR TÉRMICO MAJORADO

O mesmo ensaio realizado sob o TC de 800 kV foi realizado em um TC idêntico ao primeiro, porém considerando um fator térmico de 1,6 ao invés de seu fator térmico nominal de 1,2.

A figura 30 apresenta a curva de elevação de temperatura x tempo de ensaio.

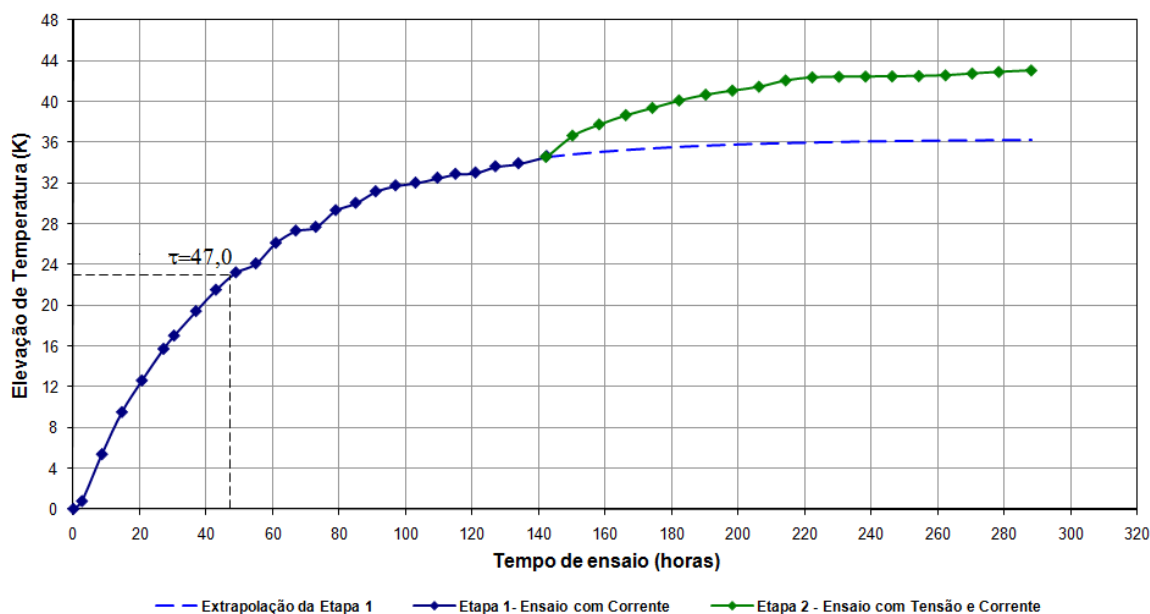


Figura 30 - Elevação de Temperatura x Tempo de Ensaio para um TC de 800 kV submetido a Ensaio Especial de Estabilidade Térmica com Fator Térmico Majorado

Para um aumento de 33% na corrente de ensaio, a elevação de temperatura devida somente a circulação de corrente aumentou cerca de 40%. A elevação de temperatura total aumentou 20%.

As perdas dielétricas, neste caso, causaram um acréscimo de 6,9°C na elevação de temperatura.

A tabela 14 apresenta um quadro comparativo entre os dois ensaios.

Tabela 14 - Quadro comparativo entre Ensaios Realizados com Diferentes Valores de Fator Térmico

	TC 800 kV Amostra 01	TC 800 kV Amostra 02
Corrente Primária de Ensaio	3600 [A]	4800 [A]
Tg δ medida ao final do ensaio de estabilidade térmica	0,174 [%]	0,173 [%]
Constante de tempo térmica	47 [h]	47 [h]
Elevação de Temperatura devida a circulação de corrente	25,9 [°C]	36,2 [°C]
Elevação de Temperatura Total	35,9 [°C]	43,1 [°C]

5.4 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIOS

A partir dos resultados, importantes aspectos relacionados à avaliação do desempenho térmico de TCs de extra-alta tensão isolados a papel-óleo são discutidos a seguir.

5.4.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURAÇÃO DOS ENSAIOS

Os critérios de estabilização apresentados nas versões ora vigentes das normas ABNT [4] [7] e IEC [8] (tabela 10, capítulo 4), mostram-se ineficazes quando aplicados a TCs com valores de constante de tempo térmica relativamente elevados.

Tomando como exemplo o ensaio realizado em um TC de 800 kV cuja constante de tempo térmica determinada é de 47 horas (*figura 25*), verifica-se que ao aplicar tais critérios para determinar-se a estabilização, o ensaio poderia ser interrompido com duração muito inferior e, conseqüentemente, a elevação de temperatura considerada seria também inferior ao valor obtido.

Na primeira leitura, realizada após 6 horas de duração, a taxa variação da elevação de temperatura era de $0,37^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ e a elevação de temperatura correspondente era de apenas $2,19^{\circ}\text{C}$.

Para o TC de 245 kV, cuja constante de tempo térmica é de 19 horas (*figura 26*), na segunda leitura, realizada após 7 horas de ensaio, a taxa de variação da elevação de temperatura era de $0,93^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ e a elevação de temperatura correspondente de apenas $6,3^{\circ}\text{C}$.

Considerando-se o ensaio realizado no TC de 145 kV, cuja constante de tempo térmica é de 14 horas (*figura 27*), na segunda leitura, realizada após 8 horas de ensaio, a taxa de variação da elevação de temperatura era de $0,87^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ e a elevação de temperatura correspondente de apenas $8,41^{\circ}\text{C}$.

Analisando-se um ensaio de elevação de temperatura, realizado apenas com aplicação de corrente, em um TC de 245 kV, similar ao TC da *figura 26*, também com constante de tempo térmica de 19 horas, a taxa de variação da elevação de temperatura tornou-se inferior a $1^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ a partir da medição realizada após 29 horas de ensaio, resultando em uma elevação de temperatura de $41,6^{\circ}\text{C}$.

Porém, a elevação de temperatura obtida ao final do ensaio, após 57 horas, foi de $48,5^{\circ}\text{C}$. Comparando-se os dois ensaios em TCs similares, a duração do ensaio seria diferente, embora a constante de tempo térmica do TC seja a mesma.

Para ensaios realizados em TCs de média tensão, cujo isolamento consistia apenas de espessuras relativamente pequenas de resina cicloalifática e, portanto, baixos valores de constante de tempo térmica, da ordem de 6 horas, os critérios de estabilização definidos nas normas vigentes mostram-se satisfatórios.

Estes resultados indicam que os critérios de estabilização devem levar em conta a constante de tempo térmica do TC sob ensaio, a fim de obterem-se resultados corretos para a elevação de temperatura do TC após estabilização.

A tabela 15 apresenta, para cada múltiplo da constante de tempo térmica, qual o valor de elevação de temperatura atingido como percentual da elevação de temperatura final do TC. Os valores foram calculados considerando-se a curva de elevação de temperatura representada através da *equação 33*.

Tabela 15 - Valor da Elevação de Temperatura representado como porcentagem da elevação de temperatura máxima em função dos múltiplos da constante de tempo térmica

Valor de t em função da constante de tempo τ	Elevação de Temperatura $\theta(t)$	Duração do ensaio para $\tau = 19$ horas	Duração do ensaio para $\tau = 47$ horas
τ	63,2%	19	47
2τ	86,5%	38	94
3τ	95,0%	57	141
4τ	98,2%	76	188
5τ	99,3%	95	235
6τ	99,8%	114	282
7τ	99,9%	133	329
8τ	100%	152	376

Nas colunas 3 e 4 tabela 15, observa-se qual seria a duração do ensaio para cada múltiplo de τ , considerando-se $\tau = 19$ horas e $\tau = 47$ horas.

A partir dos valores apresentados, o critério de estabilização apresentado na norma IEEE C57.13.5/2009 [22], ou seja, duração do ensaio equivalente a 5 constantes de tempo térmica, conduz a resultados corretos para a determinação da constante da elevação de temperatura do TC sob condições de funcionamento limite especificadas.

Considerando-se aspectos econômicos, relacionados ao custo associado à duração do ensaio, bem como a própria incerteza de medição associada à obtenção dos valores de temperatura dos enrolamentos através do método da variação da resistência, a duração do ensaio equivalente a 3 constantes de tempo térmica, conforme proposto nos projetos de revisão das normas IEC [8] e ABNT [4] [7] conduzem a resultados razoáveis para a determinação da elevação de temperatura do TC.

5.4.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE DE REFERÊNCIA

De acordo com as normas vigentes IEC e ABNT, a temperatura ambiente de referência para o cálculo da elevação de temperatura deve ser determinada a partir de termômetros ou termopares instalados ao redor do TC sob ensaio.

Entretanto, TCs isolados a papel e óleo, especialmente quando se trata de TCs de extra-alta tensão, possuem constantes de tempo térmicas elevadas em relação aos termômetros ou termopares freqüentemente utilizados, mesmo quando se considera a utilização dos mesmos em pequenos recipientes de óleo.

A norma IEEE C57.13/2008 determina como método preferencial para determinação da elevação de temperatura de referência a utilização de um TC de referência, de mesma constante de tempo térmica, utilizando-se o método da variação da resistência.

O TC de referência é colocado dentro da sala de ensaios, próximo ao TC sob ensaio, e a temperatura de um enrolamento deste TC é determinada ao longo do ensaio através da variação da resistência ôhmica do enrolamento.

A figura 31 apresenta a curva elevação de temperatura x tempo de ensaio para o TC de 800 kV, sendo a elevação de temperatura da curva azul calculada através da temperatura do TC de referência e da curva verde, calculada através do valor médio entre 3 termopares imersos em pequenos recipientes de óleo e colocados ao redor do TC sob ensaio.

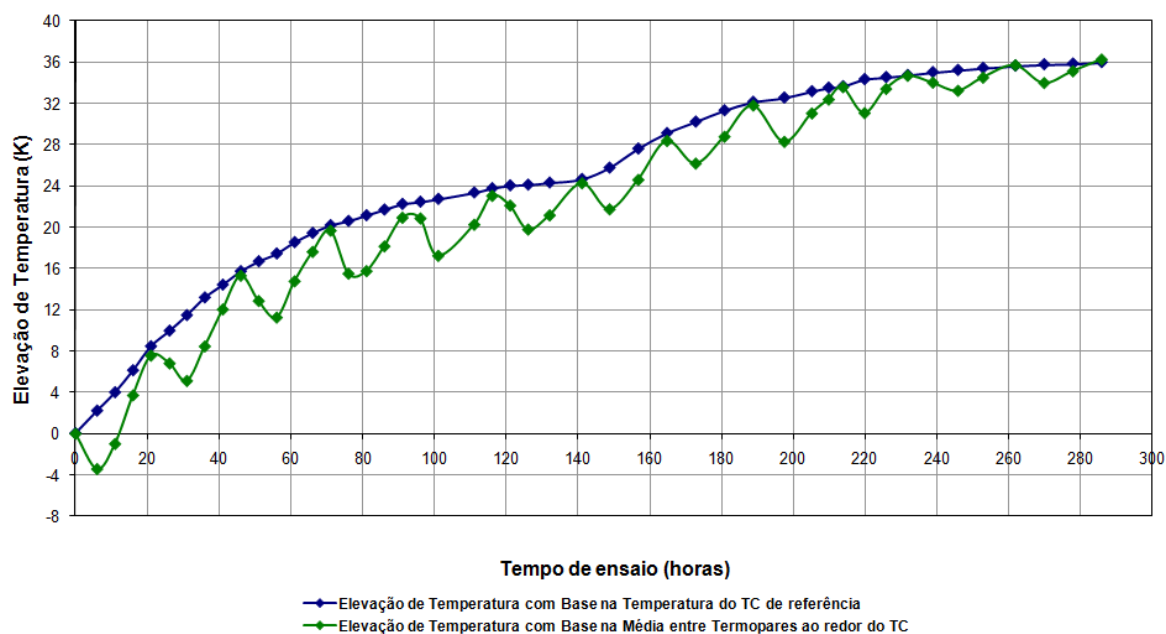


Figura 31 - Comparação entre Elevação de Temperatura calculada com base em TC de referência e com base em termopares ao redor do TC sob ensaio.

A análise destas curvas indica claramente a necessidade da utilização de um TC de referência quando se ensaiam TCs de elevadas constantes de tempo térmicas.

A utilização dos termômetros ou termopares ao redor do TC sob ensaio mostra-se adequada se a temperatura ambiente da sala de ensaio for controlada e constante durante todo o ensaio.

5.4.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A INFLUÊNCIA DAS PERDAS DIELÉTRICAS NA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA TOTAL DO TC

Os valores limites estabelecidos para a elevação de temperatura são determinados a partir dos máximos valores de temperatura aos quais os materiais utilizados na fabricação do TC podem ser submetidos sem que haja uma aceleração do envelhecimento dos mesmos.

Para que estas temperaturas não sejam excedidas durante a operação do TC em condições nominais de serviço, o projeto do TC deve levar em consideração os valores das perdas nos enrolamentos e perdas dielétricas.

As perdas nos enrolamentos são controladas através da seção dos enrolamentos e devem levar em consideração tanto a máxima dissipação permitida para os condutores, como também devem ser estabelecidos limites máximos de dissipação permitidos levando-se em consideração a associação entre as perdas nos enrolamentos e as perdas dielétricas.

As perdas dielétricas são função do valor da tangente de delta do equipamento e da tensão aplicada ao mesmo, sendo diretamente proporcionais ao valor da tangente de delta e ao quadrado da tensão aplicada. Dessa forma, as perdas dielétricas tornam-se mais representativas à medida que maiores valores de tensão de operação são especificados.

A tabela 16 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de estabilidade térmica realizados neste trabalho, incluindo, para cada caso, os valores das perdas nos enrolamentos e das perdas dielétricas.

A partir da tabela 16 verifica-se que para tensões mais elevadas, as perdas dielétricas assumem valores muito significativos em relação às perdas nos enrolamentos, o que se reflete na elevação de temperatura do TC.

O objetivo de um ensaio de elevação de temperatura é submeter o equipamento à condição mais severa no que se refere a perdas, respeitando-se os limites para os quais o equipamento foi projetado.

Os ensaios tradicionais de elevação de temperatura, sem a aplicação da tensão ao isolamento, não reproduzem de forma adequada as máximas condições nominais de operação.

Para tensões mais baixas, a contribuição das perdas dielétricas para a elevação de temperatura total do equipamento é pouco representativa ou desprezível.

Tabela 16 - Resumo dos Ensaios de Estabilidade Térmica Realizados.

	800 kV Amostra 01	800 kV Amostra 02	245 kV	145 kV
Elevação de Temperatura Total	36,0 [°C]	43,1 [°C]	26,7 [°C]	21,9 [°C]
Elevação de Temperatura Adicional devida às Perdas Dielétricas	10,0 [°C]	6,9 [°C]	2,9 [°C]	1,3 [°C]
Perdas nos Enrolamentos Secundários à temperatura final do ensaio	29,2 [W]	51,9 [W]	39,7 [W]	45,5 [W]
Perdas no Enrolamento Primário à temperatura final do ensaio	106,4 [W]	189,2 [W]	8,0 [W]	7,0 [W]
Perdas Dielétricas à temperatura final do ensaio	145,8 [W]	145,0 [W]	14,8 [W]	5,0 [W]
Relação entre Perdas Dielétricas e Perdas nos Enrolamentos à temperatura final do ensaio	1,01	0,59	0,29	0,10

Todavia, como as perdas dielétricas são diretamente proporcionais ao quadrado da tensão aplicada, à medida que se aumenta o nível de tensão, estas se tornam cada vez mais representativas, conforme pode ser observado nos resultados apresentados na tabela 16.

Dessa forma, torna-se essencial para a avaliação do desempenho térmico de um TC de extra-alta tensão, a realização de ensaios que levem em consideração a contribuição das perdas dielétricas na elevação de temperatura, bem como, a verificação da estabilidade térmica do equipamento, verificada através do estabelecimento de um estado de equilíbrio verificado através das temperaturas dos enrolamentos e do valor da tangente de delta do isolamento.

Se houver geração excessiva de calor devido às perdas dielétricas, a dissipação do calor gerado pelos enrolamentos será prejudicada, o que resultará em temperaturas excessivas no isolamento, provocando envelhecimento do composto papel-óleo e conseqüente aumento das perdas dielétricas até que ocorra a falha do TC.

Como apresentado no item 4.1.2, a norma IEEE C57.13.5/2009 [22] estabelece que o ensaio de elevação de temperatura deve ser realizado com aplicação simultânea

de tensão e corrente sempre que as perdas dielétricas excederem a 20% das perdas nos enrolamentos. Esta condição ocorre para as duas amostras de 800 kV.

Quando as perdas dielétricas não excedem este valor, a norma permite a realização do ensaio apenas com circulação de corrente nos enrolamentos, e a elevação de temperatura obtida ao final do ensaio é corrigida através da expressão (32), em função das perdas dielétricas e das perdas nos enrolamentos.

A tabela 17 apresenta a elevação de temperatura obtida na primeira etapa do ensaio, apenas com circulação de corrente, e o valor corrigido conforme estabelecido pela norma IEEE C57.13.5/2009 [22].

Os valores obtidos demonstram a validade do método, respeitando-se sua aplicação apenas para os casos em que as perdas dielétricas são inferiores a 20% das perdas nos enrolamentos. Para os casos em que as perdas dielétricas excedem a este limite, os valores corrigidos são muito mais elevados do que os valores obtidos no ensaio realizado com aplicação simultânea de tensão e corrente.

Contudo, este método não garante a estabilidade térmica do TC, uma vez que as perdas dielétricas são obtidas sem que o TC seja previamente aquecido.

Como visto nos itens 3.6.1 e 4.4, as perdas dielétricas são dependentes da temperatura, e uma diferença apreciável entre os valores da tangente de delta medidos a temperatura ambiente e a altas temperaturas resulta em um valor elevado para o coeficiente de temperatura α , indicando que o TC seja termicamente instável.

Dessa forma, considera-se este método útil, desde que o coeficiente α seja determinado e que as perdas dielétricas consideradas sejam medidas também à temperatura de 85°C.

Tabela 17 - Valores obtidos para Correção de Elevação de Temperatura por Perdas Dielétricas de Resultado de Ensaio Realizado com apenas Aplicação de Corrente

	800 kV Amostra 01	800 kV Amostra 02	245 kV	145 kV
Elevação de Temperatura com aplicação de corrente somente	26,0 [°C]	36,2 [°C]	23,8 [°C]	20,6 [°C]
Elevação de Temperatura com aplicação de corrente e tensão	36,0 [°C]	43,1 [°C]	26,7 [°C]	21,9 [°C]
Perdas nos Enrolamentos Secundários a 85°C	35,5 [W]	65,2 [W]	48,7 [W]	55,9 [W]
Perdas no Enrolamento Primário a 85°C	129,4 [W]	237,5 [W]	9,8 [W]	8,6 [W]
Perdas Dielétricas à Temperatura Ambiente	137,6 [W]	141,4 [W]	13,7 [W]	5,1 [W]
Perdas Totais nos Enrolamentos a 85°C	164,9 [W]	302,7 [W]	58,6 [W]	64,5 [W]
Relação entre Perdas Dielétricas à Temperatura Ambiente e Perdas nos Enrolamentos a 85°C	0,83	0,47	0,23	0,08
Elevação de Temperatura Corrigida considerando-se as Perdas Dielétricas à Temperatura Ambiente	47,7[°C]	53,1 [°C]	29,4 [°C]	22,2 [°C]
Diferença entre a Elevação de Temperatura Corrigida e a Elevação de Temperatura obtida no Ensaio com Tensão e Corrente	32,5%	23,2%	10,0%	1,5%
Perdas Dielétricas a 85°C	202,9 [W]	201,5 [W]	18,4 [W]	7,1 [W]
Relação entre Perdas Dielétricas e Perdas nos Enrolamentos a 85°C	1,23	0,67	0,31	0,11

5.4.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DO TC PARA DIFERENTES PERCENTUAIS DA CORRENTE NOMINAL

Freqüentemente, os fabricantes de TC são questionados pelos usuários sobre a operação do TC com correntes superiores à corrente nominal multiplicada pelo fator térmico, para condições de emergência.

O fator determinante que deve ser imposto é que o TC não deve operar acima dos limites de temperatura estabelecidos para sua classe de temperatura.

Quando se trata de TC isolado com papel e óleo e hermeticamente selado, os limites estabelecidos são de 65°C de elevação de temperatura, considerando-se uma temperatura ambiente máxima de 40°C, resultando em uma temperatura limite de operação de 105°C.

Este limite deve ser obedecido de forma a evitar processos de aceleração do envelhecimento do composto papel-óleo quando submetido a temperaturas elevadas sob estresse dielétrico.

A norma IEEE C57.13.5 [22] apresenta um método de correção da elevação de temperatura de um ensaio, caso este ensaio tenha sido realizado a uma corrente inferior ao valor da corrente de ensaio especificada, ou seja, corrente nominal multiplicada pelo fator térmico.

A correção aplicada é calculada através da expressão (31), apresentada neste trabalho em 4.1.2. De acordo com este método, a elevação de temperatura obtida através do ensaio realizado com corrente inferior, é multiplicada pela relação entre a corrente especificada e a corrente de ensaio, sendo esta relação elevada a um expoente n que é assumido como sendo igual a 2, de forma conservadora.

Este raciocínio pode também ser empregado para avaliar a elevação de temperatura do TC para um valor de corrente acima do valor da corrente nominal multiplicada pelo fator térmico, por um tempo determinado, desde que se tenha o resultado do ensaio de elevação de temperatura e a constante de tempo térmica do TC.

O expoente n igual a 2 indica que somente as perdas nos enrolamentos são relevantes para a elevação de temperatura do equipamento. Uma vez que as perdas dielétricas sejam relevantes, o valor do expoente n será inferior a 2.

Neste trabalho, foram realizados ensaios em duas amostras idênticas de TC de 800 kV. A primeira amostra foi ensaiada considerando-se o fator térmico nominal de valor igual a 1,2. O ensaio da segunda amostra foi realizado com fator térmico de valor igual a 1,6.

Capítulo 6

CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os transformadores de corrente de extra-alta tensão, isolados a papel-óleo, são caracterizados por elevadas constantes de tempo térmica, conseqüentes da espessura de papel impregnado relativamente elevada, quando comparado a um TC para menores classes de tensão.

A elevada tensão aplicada ao isolamento principal do TC aumenta consideravelmente a contribuição das perdas dielétricas em sua elevação de temperatura.

Tais fatores não podem ser negligenciados quando se pretende a avaliação de seu desempenho térmico.

Dentro deste contexto, o ensaio de elevação de temperatura apenas com aplicação de corrente aos enrolamentos é ineficaz para a avaliação de um TC de extra-alta tensão.

Da mesma forma, o critério de estabilização de variação inferior a 1°C por hora, pode resultar em um desligamento prematuro do ensaio, conduzindo a resultados totalmente equivocados.

O método mais eficaz para avaliação térmica de um TC de extra-alta tensão consiste no ensaio de estabilidade térmica, no qual o TC é submetido a condições de operação nas quais são reproduzidas as perdas totais tanto ôhmicas, quanto dielétricas.

Os critérios de estabilização devem considerar a constante de tempo térmica do equipamento e a variação do valor do fator de perdas dielétricas.

Um ensaio com duração de três vezes a constante de tempo térmica do TC é suficiente para garantir resultados confiáveis. Contudo, também deve ser considerada a estabilização do valor medido de tangente de delta.

A realização do ensaio de estabilidade térmica envolve, muitas vezes, dificuldades técnicas além de elevados de custos.

Quando as perdas dielétricas são inferiores a 20% do valor total das perdas joule, a elevação de temperatura total pode ser estimada, com um nível de exatidão

satisfatório, a partir dos valores da elevação de temperatura obtida em um ensaio somente com circulação de corrente e das perdas dielétricas e perdas joule.

Outra alternativa para a avaliação do comportamento térmico consiste na realização do ensaio tradicional de elevação de temperatura, somente com aplicação de corrente, e da medição do fator de perdas dielétricas à temperatura ambiente e a altas temperaturas, para determinação e avaliação do coeficiente de temperatura α .

Contudo, a utilização de tal procedimento deve levar em consideração que a elevação de temperatura obtida no ensaio realizado apenas com aplicação de corrente não será a máxima elevação de temperatura que o TC atingirá sob condições normais de operação.

Se a elevação de temperatura obtida no ensaio com aplicação apenas da corrente aos enrolamentos estiver próxima aos limites permitidos, recomenda-se a realização do ensaio de estabilidade térmica.

6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Um dos grandes impasses de ordem prática para a avaliação do desempenho térmico de TCs de extra-alta tensão relaciona-se ao elevado custo do ensaio de estabilidade térmica.

A realização do ensaio apenas com corrente associado à determinação do coeficiente de temperatura α , fornece informações relevantes para esta avaliação, porém ainda incompletas, uma vez que a contribuição das perdas dielétricas na elevação de temperatura total do TC permanecerá desconhecida.

A obtenção de um modelo térmico do TC de extra-alta tensão isolado a papel-óleo permitiria a determinação por cálculo da contribuição das perdas dielétricas na elevação de temperatura total do TC.

Dessa forma, o ensaio de estabilidade térmica poderia sempre ser substituído pelo seguinte grupo de ensaios:

- Ensaio de Elevação de Temperatura com circulação de corrente nos enrolamentos, sem aplicação de tensão, para determinação da elevação de temperatura provocada pelas perdas ôhmicas nos enrolamentos;

- Medição da Tangente de Delta à temperatura ambiente e em alta temperatura para a determinação do coeficiente de temperatura, o que permite a avaliação da estabilidade térmica do isolamento.

A partir de um modelo térmico, a elevação de temperatura adicional devida às perdas dielétricas poderia ser estimada a partir do valor medido do fator de perdas dielétricas em alta temperatura.

Dessa forma, propõe-se como trabalhos futuros, estudos para a determinação e validação de um modelo que permita realizar este cálculo de forma adequada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Baden, T.H.S. “Thermal Stability of High-Voltage Current Transformers” Brown Boveri Rev. 3-80
- [2] Malik, N.H., Al-Arainy, A. A., Qureshi, M.I. “Electrical Insulation in Power Systems” Taylor & Francis, 1998.
- [3] Martinez, M.L.B., “Materiais Elétricos” UNIFEI
- [4] ABNT NBR 6856:1992 Transformador de Corrente – Especificação. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Abril, 1992.
- [5] IEC 61869-1: Instrument Transformers – Part 1 General requirements. IEC – International Electrotechnical Commission. Edição 1.0. Outubro de 2007.
- [6] IEEE C57.13-2008: IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers. IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Julho de 2008
- [7] ABNT NBR 6821:1992 Transformador de Corrente – Método de Ensaio. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Abril, 1992.
- [8] IEC 60044-1: Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers. IEC – International Electrotechnical Commission - Edição 1.2 . Fevereiro de 2003.
- [9] Nunes, J “Transformer Oils – Applications and Requirements” Nynas, 2010.
- [10] Martins, M.A.G “Falhas Catastróficas em Transformadores provocadas pelo Sulfureto de Cobre. Causas e Soluções.” Ciência e Tecnologia dos Materiais, Vol. 20 n°3/4, 2008.
- [11] Martins, M.A.G. “Furfuraldeído – Um indicador prático da Degradação Térmica do Papel Kraft de Transformadores” Ciência e Tecnologia dos Materiais, Vol. 19 n°1/2, 2007.
- [12] Nunes, J, Pahlavanpour, B. “Os Recentes Desenvolvimentos na Análise de Gases Dissolvidos (DGQ)” XIII ERIAC, 2009.
- [13] Batista, D. A. “Desenvolvimento de Metodologia Colorimétrica para Dosagem de Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2005.
- [14] Maslov, M “Moisture and Water Resistance of Electrical Insulation” MIR Publishers, 1979.

- [15] Vasconcelos, V, Alves, M.E.G., Moura, G.A. “Monitoramento da Umidade no Óleo Isolante de Transformadores de Potência visando Aumento da Confiabilidade Operativa” CLADE 2008.
- [16] Wikrota, R. “Regeneração de Óleo Mineral Isolante Envelhecido: Remoção de Produtos de Oxidação”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2004.
- [17] CIGRÉ Study Committee A3 “State of the Art of Instrument Transformers” CIGRÉ 2009.
- [18] AREVA T&D. “CTH – Transformadores de Corrente 72,5 a 765 kV”. Catálogo. 2004.
- [19] ABB “Outdoor Instrument Transformers – Buyer’s Guide”. Catálogo. 2009.
- [20] Gorlini, G, Mosca, W, Tellarini, M. “The Evaluation of Aging Conditions of High Voltage Current Transformers” CESI Publication 76/11.
- [21] IEC 61869-2: Instrument Transformers – Part 2: Specific Requirement for Current Transformers. Committee Draft 38/357A/CD. IEC – International Electrotechnical Commission. Julho de 2007.
- [22] IEEE standard for Performance and Test Requirements for Instrument Transformers of a Nominal System Voltage of 115 kV and Above. IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Dezembro de 2009.
- [23] Companhia Hidro Elétrica do São Francisco CHESF “Especificações Técnicas – Transformadores de Corrente 500 kV, 230 kV, 138 kV e 69 kV – ET/DSE-685” Janeiro de 2006.
- [24] ESKOM “NRS 029:2002 – Current Transformers for rated AC voltage from 3,6kV to 420 kV. 2002.
- [25] Ries, W “Transformadores – Fundamentos para o Projeto e Cálculo” EDIPUCRS, 2007.
- [26] Zirbes, R., Rolim, J.G., Zürn, H. H., “Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral” Revista Controle & Automação, Vol. 16, Agosto e Setembro de 2005.
- [27] Moretti, A., Nadali, C., Serena, E., “Evaluation of Insulation Condition in High Voltage Current Transformers” CIGRÉ Symposium 05-87

ARTIGO PUBLICADO

Spessola, F.E., Martinez, M.L.B. “Ensaio para Avaliação do Comportamento Térmico de Transformadores de Corrente de Extra-Alta Tensão – A Influência das Perdas Dielétricas na Elevação de Temperatura”, SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Novembro de 2009.