



**ABNT-Associação
Brasileira de
Normas Técnicas**

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar
CEP 20003-900 - Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro - RJ
Tel.: PABX (021) 210-3122
Telex: (021) 34333 ABNT - BR
Endereço Telegráfico:
NORMATÉCNICA

Copyright © 1990,
ABNT-Associação Brasileira
de Normas Técnicas
Printed in Brazil/
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

MAIO 1993

NBR 5380

Transformador de potência

Método de ensaio

Origem: Projeto 03:014.01-002/1988
CB-03 - Comitê Brasileiro de Eletricidade
CE-03:014.01 - Comissão de Estudos de Transformadores de Potência
NBR 5380 - Power transformer - Method of test
Descriptor: Transformer
Esta Norma substitui a NBR 5380/1982
Válida a partir de 30.06.1993

Palavra-chave: Transformador

59 páginas

SUMÁRIO

- 1 Objetivo
- 2 Documentos complementares
- 3 Definições
- 4 Execução dos ensaios
- ANEXO A - Figuras
- ANEXO B - Ensaio de descargas parciais - Critérios a serem seguidos na execução e procedimentos após um ensaio malsucedido
- ANEXO C - Ensaio de elevação de temperatura - Determinação estatística da resistência ôhmica do enrolamento no instante do desligamento
- ANEXO D - Circuitos usuais para ensaio de medição de impedância de seqüência zero
- ANEXO E - Ensaio de descargas parciais - Localização de fontes de descargas parciais por meio de medições multiterminais e comparação de perfis

Índice

1 Objetivo

Esta Norma prescreve os métodos de ensaio relativos aos transformadores abrangidos pela NBR 5356.

Notas: a) Enquanto não vigorarem normas aplicáveis especificamente aos transformadores não abrangidos pela NBR 5356 ou a outros transformadores especiais, este método de ensaio pode ser aplicado, no que couber.

b) Quando, nesta Norma, for mencionado o termo "óleo", ele se refere tanto ao óleo propriamente dito, quanto a líquidos sintéticos, salvo quando houver distinção expressa.

2 Documentos complementares

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- NBR 5356 - Transformador de potência - Especificação
- NBR 5389 - Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão - Método de ensaio
- NBR 5456 - Eletricidade geral - Terminologia
- NBR 5458 - Transformadores de potência - Terminologia
- NBR 6936 - Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão - Procedimento
- NBR 6937 - Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão - Dispositivos de medição - Procedimento
- NBR 7070 - Guia para amostragem de gases e óleo em transformadores e análise dos gases livres e dissolvidos - Procedimento
- NBR 7277 - Medição do nível do ruído de transformadores e reatores - Método de ensaio
- NBR 7570 - Guia para ensaios de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores - Procedimento
- NBR 8153 - Guia de aplicação de transformadores de potência - Procedimento

NBR 10443 - Tintas e vernizes - Determinação da espessura de película seca - Método de ensaio

NBR 11003 - Tintas - Determinação da aderência - Método de ensaio

NBR 11388 - Sistemas de pintura para equipamentos e instalações de subestações elétricas - Procedimento

ANSI C63-2 - Specification for electromagnetic noise and field - Strenght instrumentation, 10 kHz to 1 GHz

ASTM D 1014 - Method for conducting exterior exposure tests of paints on steel

ASTM D 1735 - Practice for testing water resistance of coatings using water fog apparatus

ASTM D 3515 - Specification for hot-mixed, hot-loid bituminous paving mixtures

CISPR 16 - Specification for radio interference measuring apparatus and measuring methods

3 Definições

Os termos técnicos utilizados nesta Norma estão definidos nas NBR 5456 e NBR 5458.

4 Execução dos ensaios

4.1 Generalidades

4.1.1 Os ensaios devem ser executados nas instalações do fabricante, salvo acordo diferente entre este e o comprador.

4.1.2 Os componentes e acessórios que possam ter influência sobre o desempenho do transformador, em determinado ensaio, devem estar nos seus respectivos lugares durante o ensaio em apreço.

4.1.3 Enrolamentos com derivações devem estar ligados nas suas derivações principais, salvo quando prescrito de forma diferente nesta Norma ou mediante acordo entre fabricante e comprador.

4.2 Resistência elétrica dos enrolamentos

4.2.1 Neste ensaio devem ser registrados:

- a) a resistência elétrica de cada enrolamento;
- b) os terminais entre os quais é medida a resistência elétrica;
- c) a temperatura dos enrolamentos.

4.2.2 A medição deve ser efetuada com corrente contínua por um método de ponte ou pelo método de queda de tensão. Quando a corrente nominal do enrolamento for inferior a 1 A, deve ser utilizado um método de ponte.

4.2.3 A corrente utilizada no ensaio não deve ser superior a 15% da corrente nominal do enrolamento considerado.

4.2.4 No método da queda de tensão, se utilizados instrumentos de deflexão, devem ser feitas leituras com alguns valores diferentes de corrente, de forma a ficar demonstrada a constância dos valores de resistência calculados dessas leituras. Demonstrado isto, as demais leituras devem ser feitas com um único valor de corrente.

4.2.5 Na medição da resistência a frio, o tempo até a estabilização da corrente de medição deve ser registrado e utilizado para orientação ao efetuar medições de resistência a quente, após o desligamento da energia no ensaio de elevação de temperatura.

4.2.6 Deve-se observar que o desligamento da fonte de corrente contínua pode produzir sobretensões consideráveis, podendo danificar os instrumentos de medição.

4.2.7 Para transformadores secos, a temperatura registrada deve ser a média das leituras de pelo menos três termômetros ou pares termoeletrônicos colocados na superfície do enrolamento. Resistência e temperatura do enrolamento devem ser medidas simultaneamente, e a temperatura do enrolamento, medida por termômetro, deve ser aproximadamente igual à do meio circulante.

4.2.8 Para transformadores imersos em óleo, a temperatura dos enrolamentos a frio pode ser considerada igual à temperatura média do óleo, desde que o transformador tenha estado desenergizado e num ambiente de temperatura, tanto quanto possível, estável durante tempo suficiente (3 h a 8 h, dependendo do tamanho do transformador) para que haja equilíbrio térmico. A temperatura do óleo é, então, medida por meio de um ou mais termômetros ou pares termoeletrônicos imersos no óleo.

4.2.8.1 A temperatura média do óleo é tomada como a média das temperaturas do óleo no topo e no fundo.

4.2.8.2 Em transformadores de potência nominal igual ou inferior a 5000 kVA, a diferença entre as temperaturas do óleo do topo e do fundo pode ser desprezível, sendo suficiente, neste caso, medir a temperatura do topo do óleo.

4.2.8.3 Ao medir a resistência a frio para fins de elevação de temperatura, deve-se tomar cuidado especial para uma determinação precisa de temperatura média do enrolamento. Para isto, a diferença entre as temperaturas do óleo no topo e no fundo não deve ultrapassar 5°C. Para conseguir-se esta condição mais rapidamente, pode-se fazer circular o óleo por meio de bomba.

4.2.9 Os valores de resistência, medidos na temperatura do meio circundante, são convertidos para a temperatura de referência aplicável à respectiva tabela da NBR 5356 ou para outra temperatura, como, por exemplo, a do ensaio de perdas em carga, através da fórmula:

$$R_2 = R_1 \frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k}$$

Onde:

R_1 = resistência medida na temperatura θ_1 , em Ω

R_2 = resistência calculada na temperatura θ_2 , em Ω

k = 234,5 para o cobre e 225,0 para o alumínio

θ_2 = temperatura do meio circundante, em °C

θ_1 = temperatura de referência, em °C

4.3 Relação de tensões

4.3.1 Generalidades

4.3.1.1 O ensaio de relação de tensões deve ser realizado aplicando-se a um dos enrolamentos uma tensão igual ou inferior à tensão nominal deste enrolamento, e com frequência igual ou superior à nominal.

4.3.1.2 Para transformadores trifásicos, apresentando fases independentes e com terminais acessíveis, procede-se, indiferentemente, usando-se corrente monofásica ou trifásica, como for mais conveniente. Se o enrolamento onde a tensão é aplicada estiver ligado em estrela com neutro inacessível, usa-se corrente trifásica, procedendo-se como para transformadores monofásicos.

4.3.1.3 Os métodos usados para o ensaio de relação de tensões são:

- a) método do voltímetro;
- b) método do transformador-padrão;
- c) método do transformador de referência de relação variável;
- d) método potenciométrico.

4.3.2 Método do voltímetro

4.3.2.1 Usar dois voltímetros (com transformadores de potencial, se necessário); um para medir a tensão do enrolamento de alta-tensão e o outro para o de baixa-tensão. Os dois voltímetros devem ser lidos simultaneamente.

4.3.2.2 Deve ser feito um novo grupo de leituras com os dois voltímetros permutados. Tomar a média das relações obtidas nos dois grupos de medidas, a fim de compensar os erros dos voltímetros.

4.3.2.3 Quando se ensaiam vários transformadores de iguais características, o trabalho pode ser simplificado, aplicando-se este ensaio a apenas um transformador e comparando-se os demais com este, considerado como padrão, de acordo com o método do transformador-padrão, prescrito em 4.3.3.

4.3.3 Método do transformador-padrão

4.3.3.1 Excitar o transformador a ser ensaiado e um transformador-padrão da mesma relação nominal, ligados em paralelo, de acordo com a Figura 1 do Anexo A, inserindo-se numa das ligações do secundário um voltímetro ou outro dispositivo indicador de tensão. Este indica a diferença de tensão, se houver.

4.3.3.2 Outra modalidade deste método consiste em excitar o transformador a ser ensaiado e o transformador-padrão da mesma relação nominal, ligados em paralelo, do lado da fonte, de acordo com a Figura 2 do Anexo A, e medir as tensões secundárias com dois voltímetros. A

seguir, permutar os voltímetros e repetir o ensaio. Adotar para o valor da relação a média dos valores obtidos.

4.3.4 Método do transformador de referência de relação variável

Usar um equipamento, especialmente construído, o qual incorpora um transformador de relação variável e um indicador de tensão. A escala do equipamento indica a relação quando o indicador de tensão registra deflexão nula.

Nota: Quando se utiliza este método, pode-se, também, verificar a polaridade, o deslocamento angular e a seqüência de fases dos enrolamentos.

4.3.5 Método potenciométrico

Ligar um resistor de valor adequado, conforme a Figura 3 do Anexo A. Deslocar o contato móvel ao longo do resistor até que o indicador de tensão registre deflexão nula. Neste ponto, medir as resistências R_1 e R_2 , cuja relação exprime a relação de tensões do transformador.

4.4 Resistência de isolamento

4.4.1 Medir a resistência de isolamento com um megaohmímetro de 1000 V, no mínimo, para enrolamentos de tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 72,5 kV, e de 2000 V, no mínimo, para enrolamentos de tensão máxima do equipamento superior àquela.

4.4.2 Curto-circuitar os terminais de cada enrolamento do transformador sob ensaio. Fazer as medições nas mesmas ligações indicadas (ver 4.12.2) para o ensaio de fator de potência do isolamento. Ligar o megaohmímetro, mantendo-se a tensão constante durante, no mínimo, 1 min, e fazer a leitura.

4.4.3 Anotar nessa leitura a tensão do megaohmímetro utilizado e a temperatura do enrolamento sob ensaio. Para esta última leitura, o transformador deve estar em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente.

4.5 Polaridade

4.5.1 Os métodos usados para a verificação da polaridade de transformadores monofásicos são os seguintes:

- a) método do transformador-padrão;
- b) método do golpe indutivo de corrente contínua;
- c) método de corrente alternada;
- d) método do transformador de referência de relação variável.

4.5.2 O método do transformador-padrão consiste em comparar o transformador a ensaiar com um transformador-padrão de polaridade conhecida, que tenha a mesma relação de tensões nominais, de acordo com a Figura 4 do Anexo A.

4.5.2.1 Ligar em paralelo os enrolamentos de alta-tensão dos dois transformadores, tendo-se o cuidado de ligar entre si os terminais marcados, como de mesma polaridade.

Ligar entre si, na baixa-tensão, os terminais da esquerda de quem olha pelo lado da baixa-tensão, deixando livres os da direita. Aplicar uma tensão reduzida no enrolamento de alta-tensão e medir o valor da tensão entre os dois terminais livres. Se este valor for nulo, ou praticamente nulo, os dois transformadores têm a mesma polaridade.

4.5.3 Para o método do golpe indutivo com corrente contínua, ligar os terminais de alta-tensão a uma corrente contínua. Instalar um voltímetro de corrente contínua entre esses terminais, de modo a se obter uma deflexão positiva no instante do golpe. Transferir cada terminal do voltímetro para o terminal de baixa-tensão diretamente adjacente (p.ex.: na Figura 5 do Anexo A, o terminal do voltímetro ligado a H1 é transferido para X1, e o que estiver ligado a H2 é transferido para X2; na Figura 6 do Anexo A, o terminal do voltímetro ligado a H1 é transferido para X2, e o que estiver ligado a H2 é transferido para X1). Desligar, em seguida, a corrente de alimentação, observando-se o sentido de deflexão do voltímetro. Quando as duas deflexões são em sentidos opostos, a polaridade é subtrativa (ver Figura 5 do Anexo D). Quando as duas deflexões são no mesmo sentido, a polaridade é aditiva (ver Figura 6 do Anexo A).

4.5.4 Para o método de corrente alternada, ligar entre si os terminais adjacentes, um de alta-tensão e outro de baixa-tensão; os da esquerda, por exemplo (ver Figura 7 do Anexo A).

4.5.4.1 Aplicar uma tensão alternada conveniente aos terminais de alta-tensão; ler as indicações de um voltímetro, ligado primeiramente entre os terminais de alta-tensão, e depois entre os terminais adjacentes livres (os da direita, por exemplo H2, X2). Se a primeira leitura é maior que a segunda, a polaridade é subtrativa; em caso contrário, é aditiva.

4.5.4.2 Este método é praticamente limitado a transformadores cuja relação de tensões nominais é, no máximo, 30:1, para que as diferenças das leituras dos voltímetros possam ser devidamente apreciadas, a não ser que se empreguem transformadores de potencial.

4.5.5 Para o método do transformador de referência de relação variável, usar um equipamento especialmente construído, o qual incorpora um transformador de relação variável e um indicador de tensão. Quando o indicador de tensão indicar deflexão nula, a polaridade é a mesma do instrumento.

4.5.6 A polaridade correspondente a cada fase de um transformador polifásico pode ser verificada da mesma forma que para os transformadores monofásicos.

4.6 Deslocamento angular

4.6.1 Este ensaio permite a obtenção dos elementos, para verificação do diagrama fasorial das ligações do transformador.

4.6.1.1 Ligar os terminais de alta-tensão a uma fonte de tensão reduzida.

4.6.1.2 Ligar entre si os terminais H1, X1.

4.6.1.3 Medir as tensões entre vários pares de terminais, de acordo com os exemplos das Figuras 8 e 9 do Anexo A.

4.6.2 Observar que, no caso de transformadores com relação de tensões nominais superior a 30:1, as leituras dos voltímetros não podem ser devidamente apreciadas, a não ser que se empreguem transformadores de potencial.

4.7 Seqüência de fases para transformadores polifásicos

4.7.1 Neste ensaio, utilizar um dispositivo indicador, como um motor trifásico ou outro aparelho de circuito dividido ou equivalente, que deve ser ligado aos terminais de alta-tensão do transformador, diretamente ou por meio de transformadores auxiliares. Excitar o transformador a ensaiar pelo lado da baixa-tensão, utilizando-se uma tensão adequada. Observar, em seguida, o sentido de rotação do dispositivo indicador. O dispositivo indicador deve ser transferido em seguida para o lado da baixa-tensão, ligando-se a X1 o terminal do dispositivo indicador que estava ligado a H1; a X2 o que estava ligado a H2; e a X3 o que estava ligado a H3.

4.7.2 Excitar novamente o transformador pelo mesmo lado e a tensão adequada, sem se alterarem as ligações de excitação. Observar novamente o sentido da rotação do dispositivo indicador.

4.7.3 A seqüência de fases do transformador está certa quando os sentidos de rotação do dispositivo indicador são os mesmos.

4.8 Perdas em vazio e corrente de excitação

4.8.1 As perdas em vazio e a corrente de excitação devem ser referidas à tensão senoidal pura, com fator de forma 1,11. As perdas em vazio devem ser medidas com tensão nominal na derivação principal, ou, quando medidas numa outra derivação, com a respectiva tensão de derivação. Quando, nas disposições seguintes desta seção, for mencionada a tensão nominal, ela deve referir-se a medições efetuadas na derivação principal. As mesmas disposições devem ser aplicadas a medições feitas em outras derivações, porém com a respectiva tensão de derivação. As medições devem ser realizadas na freqüência nominal.

4.8.2 As medições das perdas em vazio em transformadores monofásicos são efetuadas ligando-se o transformador de acordo com as Figuras 10 ou 11 do Anexo A, caso sejam, necessários, ou não, transformadores para instrumentos. As ligações podem ser feitas tanto no enrolamento de alta-tensão, como no de baixa-tensão, sendo mais conveniente este último, para maior facilidade na medição da corrente.

4.8.2.1 Ajustar a freqüência para o valor nominal, e a tensão para o valor nominal, pelo voltímetro de valor médio. Anotar, simultaneamente, os valores de freqüência, tensão eficaz, potência, tensão média e corrente. Após desligar o transformador sob ensaio, fazer nova leitura no wattímetro, a qual deve ser subtraída da anterior e correspondente às perdas no circuito de medição. As perdas em vazio consistem, principalmente, nas perdas por histerese e por correntes de Foucault (parasitas), e são função

do valor, frequência e forma de onda da tensão de alimentação.

4.8.2.2 Mesmo com uma tensão de alimentação senoidal, esta pode ser distorcida pelos harmônicos que existem na corrente de excitação, dos quais o terceiro, o quinto, o sétimo e o nono são predominantes. Para a medição das perdas em vazio com uma tensão com forma de onda distorcida, deve-se introduzir uma correção no valor medido das perdas, para referi-las à tensão senoidal pura. Isto é válido para transformadores monofásicos e também para transformadores trifásicos, quando o enrolamento em triângulo é energizado. Se todos os enrolamentos são ligados em estrela, a correção não é possível. Neste caso, a soma do quinto e do sétimo harmônicos não deve exceder 5% da tensão de linha; e, para verificação, deve ser obtido um oscilograma de tensão.

4.8.2.3 As perdas por histerese são função do valor máximo da densidade de fluxo, a qual é função do valor médio da tensão de alimentação ($V_{méd.}$), enquanto as perdas por corrente de Foucault (parasitas) são função do valor eficaz da tensão de alimentação ($V_{ef.}$). Em consequência, a correção anteriormente mencionada só é possível se os valores médio e eficaz da tensão de alimentação forem medidos. A tensão nominal deve ser ajustada pelo voltímetro de valor médio. A correção a ser feita nas perdas em vazio medidas é:

$$W_o = W_m \cdot \frac{100}{W_h \% + kW_i \%} \quad (1)$$

$$k = \left(\frac{V_{ef.}}{1,11 \cdot V_{méd.}} \right)^2 \quad (2)$$

Onde:

W_o = perdas em vazio para tensão senoidal pura, em W

W_m = perdas em vazio medidas, em W

W_h = perdas por histerese, em %, relativas a W_m

W_i = perdas por correntes de Foucault, em %, relativas a W_m

$V_{ef.}$ = valor eficaz da tensão de alimentação, lido no voltímetro V_1 (ver Figuras 10 e 11 do Anexo A), em V

$V_{méd.}$ = valor médio da tensão de alimentação, lido no voltímetro V_2 (ver Figuras 10 e 11 do Anexo A), em V

4.8.2.3.1 Os valores de W_h e W_i , a serem substituídos na equação 1, devem ser medidos; contudo, na falta destes, os seguintes valores típicos podem ser usados para chapas laminadas a frio de grão orientado:

W_h (%)	W_i (%)
50	50

4.8.3 O método descrito em 4.8.2, para transformadores monofásicos, pode ser aplicado aos transformadores trifásicos, com as modificações de 4.8.3.1 a 4.8.3.4.

4.8.3.1 Os instrumentos são ligados de acordo com as Figuras 12 a 15 do Anexo A.

4.8.3.2 Usar dois wattímetros, de acordo com a Figura 12 do Anexo A, e tomar três pares de leituras separadas, permutando ciclicamente as ligações das fases.

4.8.3.3 Tomar a soma algébrica das leituras dos dois wattímetros em cada uma das três posições: adotar a média aritmética das três somas algébricas para valor das perdas em vazio do transformador, a qual deve ser corrigida como para os transformadores monofásicos.

4.8.3.4 Usar três wattímetros, de acordo com as Figuras 13 a 15 do Anexo A, e tomar as leituras dos três wattímetros, a soma das quais é o valor das perdas em vazio, W_m , do transformador, a qual deve ser corrigida como para os transformadores monofásicos.

4.8.4 Para a medição da corrente de excitação, as ligações a serem usadas são indicadas nas Figuras 10 a 15 do Anexo A, podendo-se retirar os wattímetros do circuito.

4.8.4.1 Ajustar a tensão nominal pelo voltímetro de valor eficaz V_1 , e fazer a leitura dos amperímetros; seja I_1 a média destas leituras. Ajustar novamente a tensão nominal pelo voltímetro de valor médio V_2 e fazer a leitura do voltímetro de valor eficaz V_1 . Fazer as leituras dos amperímetros e determinar a média I_2 destas leituras. Se estas leituras de V_2 e V_1 não diferirem entre si em mais de 10%, o valor da corrente de excitação será a média de I_1 e I_2 . Se as leituras de V_2 e V_1 diferirem entre si em mais de 10%, o método de medição deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

4.9 Perdas em carga e impedância de curto-circuito

Nestes ensaios, usar wattímetros de baixo fator de potência (fator de potência de 5% ou 10%), para se obterem leituras satisfatórias; se eles já forem compensados para as perdas das bobinas de potencial, esse fato deve ser levado em conta.

4.9.1 Transformadores monofásicos de dois enrolamentos

4.9.1.1 Ligar um dos enrolamentos do transformador em curto-circuito (de preferência, e para maior facilidade, o de baixa-tensão), de acordo com a Figura 16 do Anexo A. Aplicar ao outro enrolamento uma tensão na frequência nominal e de valor suficiente para nele circular a corrente nominal, exceto nos casos de 4.9.6. Esta tensão é a tensão de curto-circuito deste enrolamento (e_2).

4.9.1.2 Os condutores utilizados para curto-circuitar o transformador devem ter seção igual ou superior à dos seus respectivos terminais, e devem ser tão curtos quanto possível e afastados de massas magnéticas.

4.9.1.3 As medições devem ser executadas rapidamente a intervalos suficientes, para a elevação de temperatura não causar erros significantes.

4.9.1.4 Tomar leituras simultâneas da corrente, da tensão aplicada ao enrolamento e da potência absorvida pelo transformador em curto-circuito.

4.9.1.5 Determinar a correção de potência, devida à carga dos instrumentos situados entre o amperímetro e o transformador, fazendo-se nova leitura no wattímetro após desligado o transformador sob ensaio e mantendo-se a mesma tensão aplicada ao enrolamento.

Notas: a) Se o wattímetro já foi compensado para as perdas de sua bobina de potencial, a potência lida corresponde às perdas no equipamento de medição de tensão.

b) A correção da potência absorvida pelo transformador também pode ser obtida por cálculo, partindo-se das resistências e demais parâmetros dos instrumentos usados.

4.9.1.6 A potência realmente absorvida pelo transformador (W_E) à temperatura é igual à diferença entre a potência aparente absorvida (W_1) e a potência devida à carga dos instrumentos (W_0), isto é:

$$W_E = W_1 - W_0$$

4.9.1.7 A temperatura dos enrolamentos deve ser determinada antes e depois do ensaio, de acordo com o prescrito em 4.2. A média aritmética das duas leituras deve ser considerada como a temperatura do ensaio (θ).

4.9.1.8 Para se obterem as perdas em carga na temperatura de referência (θ'), a partir das perdas em carga na temperatura de ensaio (θ), deve-se levar em conta o prescrito em 4.9.1.8.1 a 4.9.1.8.3

4.9.1.8.1 As perdas em carga de um transformador (W_E) compõe-se das perdas ôhmicas (W_R) e das perdas adicionais (W_A).

4.9.1.8.2 As perdas ôhmicas (W_R) aumentam com a elevação de temperatura, e são determinadas pela soma das perdas I^2R dos dois enrolamentos, onde I representa as correntes com as quais foi feito o ensaio de perdas em carga, e R representa as resistências medidas dos respectivos enrolamentos, corrigidas para a temperatura (θ)

$$W_R = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

4.9.1.8.3 As perdas diminuem com a elevação de temperatura e são a diferença entre as perdas em carga medidas e as perdas ôhmicas calculadas:

$$W_A = W_E - W_R$$

Assim, quando se deseja converter as perdas em carga de uma temperatura θ para outra temperatura de referência θ' , os dois componentes se convertem separadamente, como segue:

$$W'_R = W_R \frac{k + \theta'}{k + \theta}$$

$$W'_A = W_A \frac{k + \theta'}{k + \theta}$$

Onde:

W'_R = perdas ôhmicas à temperatura θ' , em W

W'_A = perdas adicionais à temperatura θ' , em W

k = 234,5 para cobre e 225,0 para alumínio

θ = temperatura do ensaio, em °C

θ' = temperatura de referência, em °C

As perdas em carga, na temperatura desejada (θ'), são então calculadas pela fórmula:

$$W'_E = W'_A + W'_R$$

4.9.1.9 A impedância de curto-circuito (z), referida ao enrolamento sob tensão, é constituída pela componente resistiva (r) e pela componente reativa (x). Estas são obtidas através das fórmulas:

$$z = \frac{e_z}{I_n}$$

$$r = \frac{W_E}{I_n^2}$$

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}$$

Onde:

z = impedância de curto-circuito, referida ao enrolamento sob tensão, em Ω

e_z = tensão de curto-circuito, referida ao enrolamento sob tensão, em V

I_n = corrente nominal do enrolamento, em A

r = componente resistiva, em Ω

x = componente reativa, em Ω

4.9.1.10 A impedância de curto-circuito é, geralmente, expressa em percentagem. Neste caso, seu valor é idêntico ao da tensão de curto-circuito, em percentagem, sendo determinado pelas fórmulas:

$$z \% = \frac{e_z}{V_n} \cdot 100$$

$$r \% = \frac{W_E}{P_n} \cdot 100$$

$$x \% = \sqrt{(z \%)^2 + (r \%)^2}$$

Onde:

V_n = tensão nominal do enrolamento, em V

P_n = potência nominal do enrolamento, em VA

4.9.1.11 A componente resistiva (r ou $r \%$) varia com a temperatura, enquanto que a componente reativa (x ou $x \%$) não varia. Assim, quando se deseja converter a impedância de curto-circuito de uma temperatura θ para outra temperatura de referência θ' , calcula-se o novo valor da componente resistiva através das fórmulas:

$$r' = \frac{W'_E}{I_n^2} \quad \text{ou}$$

$$r' \% = \frac{W'_E}{P_n} \cdot 100$$

4.9.1.11.1 A impedância de curto-circuito, na temperatura θ' , é, então, calculada pelas fórmulas:

$$z' = \sqrt{r'^2 + x'^2}$$

$$z' \% = \sqrt{(r' \%)^2 + (x' \%)^2}$$

4.9.2 Transformadores trifásicos de dois enrolamentos

4.9.2.1 Ligar em curto-circuito os três terminais de alta-tensão ou os de baixa-tensão, de acordo com a Figura 17 do Anexo A. Ligar os outros três terminais a uma fonte trifásica de tensões simétricas, na frequência nominal do transformador. Ajustar o valor destas tensões, de modo a fazer nele circular a corrente nominal, exceto nos casos de 4.9.6.

4.9.2.2 O procedimento subsequente para execução do ensaio e determinação dos valores é análogo ao indicado para transformadores monofásicos.

4.9.3 Autotransformadores monofásicos e trifásicos

4.9.3.1 Os enrolamentos-série e comum dos autotransformadores devem ser tratados como enrolamentos separados.

4.9.3.2 Fazer as ligações de acordo com as Figuras 18 e 19 do Anexo A e proceder analogamente, como para os transformadores de dois enrolamentos.

4.9.4 Transformadores de três enrolamentos e autotransformadores com terciário

4.9.4.1 Num transformador de três enrolamentos, monofásicos ou trifásicos, fazer medidas das impedâncias de curto-circuito para cada combinação (dois a dois) de enrolamentos, deixando o outro enrolamento aberto (dando, então, três valores de e_2). A maneira de proceder é igual à empregada para transformadores de dois enrolamentos. Se as potências dos diferentes enrolamentos não são as mesmas, a corrente mantida no ensaio deve corresponder à potência do enrolamento de menor potência sob ensaio. Entretanto, quando todos estes dados forem convertidos em porcentagem, eles devem ser referidos à mesma potência, preferivelmente à do enrolamento de maior potência.

4.9.4.2 As características individuais da impedância equivalente dos enrolamentos, considerados separadamente, podem ser determinadas pelas seguintes fórmulas:

$$z_1 = \frac{z_{12} - z_{23} + z_{31}}{2}$$

$$z_2 = \frac{z_{23} - z_{31} + z_{12}}{2}$$

$$z_3 = \frac{z_{31} - z_{12} + z_{23}}{2}$$

Onde:

z_{12} , z_{23} e z_{31} = os valores das impedâncias calculadas para cada combinação de enrolamento, a partir das tensões de curto-circuito respectivas, por unidade na base da potência nominal do enrolamento respectivo

4.9.4.2.1 Estas equações envolvem números complexos. Equações análogas podem ser usadas para calcular as resistências e as reatâncias equivalentes dos enrolamentos separadamente.

4.9.4.3 A maneira de proceder quanto à correção devida à temperatura é a mesma prescrita para transformadores de dois enrolamentos.

4.9.4.4 A perda em carga, para transformador de três enrolamentos, é, aproximadamente, a soma das perdas de cada enrolamento, determinadas para as condições de carga em cada enrolamento. As perdas em cada enrolamento são calculadas através das fórmulas:

$$W_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 W_{12} - \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{23} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{13} \right]$$

$$W_2 = \frac{1}{2 \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 W_{12} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{23} - \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{13} \right]$$

$$W_3 = \frac{1}{2 \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2} \left[- \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 W_{12} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{23} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{13} \right]$$

Onde:

P_1 , P_2 e P_3 = potências de referência dos enrolamentos para determinada condição de carregamento, especificadas pelo comprador ($P_1 > P_2 > P_3$), em VA. Se esta condição não for especificada, devem ser adotadas as respectivas potências nominais dos enrolamentos

W_{12} = perda dos enrolamentos 1 e 2, referida à potência P_2 , na temperatura de referência, em W

W_{13} = perda dos enrolamentos 1 e 3, referida à potência P_3 , na temperatura de referência, em W

W_{23} = perda dos enrolamentos 2 e 3, referida à potência P_3 , na temperatura de referência, em W

W_1 , W_2 e W_3 = perdas nos enrolamentos 1, 2 e 3, referidas às potências P_1 , P_2 e P_3 , respectivamente, na temperatura de referência, em W

4.9.4.4.1 Num autotransformador com terciário, as perdas W_1 , W_2 e W_3 não possuem significado individualmente, podendo assumir valores negativos. Mesmo neste caso, a sua soma corresponde, aproximadamente, à perda em carga do transformador.

4.9.5 Transformador com mais de três enrolamentos

Em transformadores com mais de três enrolamentos, os enrolamentos devem ser tomados aos pares, seguindo-

se o princípio do método especificado para transformadores de três enrolamentos.

4.9.6 Ensaio com corrente reduzida

4.9.6.1 Nos casos em que não for possível realizarem-se os ensaios com corrente nominal, estes devem ser realizados de acordo com o estabelecido entre fabricante e comprador.

4.9.6.2 O valor da impedância de curto-circuito, obtido no ensaio, deve ser corrigido, multiplicando-o pela relação entre a corrente nominal e a corrente de ensaio.

4.9.6.3 O valor das perdas em carga, obtido no ensaio, deve ser corrigido, multiplicando-o pelo quadrado do quociente da corrente nominal pela corrente de ensaio.

4.9.6.4 Os valores de tensão e de perdas, determinados desta forma, devem ser corrigidos para uma outra temperatura de referência (θ'), conforme prescrições das seções anteriores.

4.10 Ensaio dielétricos

Estes ensaios devem ser executados de acordo com as NBR 5389, NBR 6936 e NBR 6937.

4.10.1 Tensão suportável nominal à frequência industrial (tensão aplicada)

4.10.1.1 Todos os terminais externos do enrolamento sob ensaio devem ser ligados ao terminal da fonte de ensaio. Todos os terminais externos dos demais enrolamentos e partes metálicas (inclusive tanque e núcleo) devem ser ligados a outro terminal da fonte de ensaio e terra.

4.10.1.2 A fim de limitar o valor da tensão de ensaio, pode-se colocar um centelhador ajustado para, no mínimo, 110% do valor especificado da fonte.

4.10.1.3 O ensaio deve ser executado com tensão monofásica senoidal de frequência nominal.

4.10.1.4 Para transformadores de potência nominal igual ou inferior a 500 kVA, ensaiados com tensão de valor especificado não-superior a 50 kV, permite-se medir a tensão aplicada mediante leitura da tensão no primário do transformador de ensaio, multiplicada pela relação de tensões deste.

4.10.1.5 Deve ser medido o valor de crista da tensão de ensaio. Este valor, dividido por $\sqrt{2}$, deve ser igual ao valor especificado da tensão.

4.10.1.6 A tensão deve ser aplicada inicialmente com valor não-superior a um terço do valor especificado da tensão de ensaio, e elevada até este valor tão rapidamente quanto for compatível com a leitura correta dos instrumentos. Neste valor, a tensão deve ser mantida durante 60 s. Em seguida, ela deve ser reduzida rapidamente a menos de um terço deste valor, e desligada.

4.10.1.7 Para transformadores com enrolamentos inacessíveis, o procedimento de ensaio deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

4.10.2 Tensão induzida - Disposições gerais

4.10.2.1 Devem ser aplicadas aos terminais de um dos enrolamentos do transformador tensão alternada, de forma tão senoidal quanto possível, e frequência dentro dos limites estabelecidos na NBR 5356, para evitar corrente de excitação excessiva.

4.10.2.2 Deve ser medido o valor de crista da tensão de ensaio induzida. O valor de crista dividido por $\sqrt{2}$ deve ser igual ao valor especificado da tensão.

4.10.3 Tensão induzida para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 242 kV - Disposições gerais

4.10.3.1 A tensão deve ser aplicada inicialmente com valor não-superior a um terço do valor especificado da tensão de ensaio, e elevada até este valor tão rapidamente quanto for compatível com a leitura correta dos instrumentos. Neste valor, a tensão deve ser mantida com a duração especificada na NBR 5356. Em seguida, ela deve ser reduzida rapidamente a menos de um terço deste valor, e desligada.

4.10.3.2 Em transformadores com um enrolamento aterrado, deve-se tomar cuidado para evitar tensões induzidas eletrostaticamente entre outros enrolamentos e terra.

4.10.3.3 No caso de transformadores que tenham um terminal do enrolamento de alta-tensão aterrado, os outros enrolamentos devem ser aterrados durante o ensaio. Este aterramento, em cada enrolamento, pode ser feito em um ponto escolhido do próprio enrolamento, ou no enrolamento do transformador elevador utilizado para alimentação, ou num transformador utilizado especialmente para o aterramento.

4.10.3.4 Para transformadores de reforço, transformadores reguladores e transformadores com isolamento progressivo, o ensaio de tensão induzida vale também pelo ensaio de tensão aplicada, no caso de haver acordo entre fabricante e comprador.

4.10.4 Tensão induzida para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 242 kV - Isolamento uniforme

O circuito deve, de preferência, ser igual ao de funcionamento. Um enrolamento trifásico deve ser ensaiado com tensões trifásicas simétricas induzidas nas três fases do enrolamento. Se o enrolamento possuir terminal de neutro, este pode ser aterrado durante o ensaio.

4.10.5 Tensão induzida para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 242 kV - Isolamento progressivo

4.10.5.1 Em transformadores monofásicos, o ensaio é normalmente executado com o terminal de neutro aterrado. Se a relação de tensões puder ser variada por meio de derivações, estas devem ser utilizadas de forma a atender simultaneamente, na medida do possível, às condições de tensão de ensaio nos vários enrolamentos. Em casos excepcionais, a tensão no terminal de neutro pode ser aumentada por ligação a um transformador de reforço auxiliar, a fim de satisfazer simultaneamente às condições

de tensão de ensaio para os vários terminais do enrolamento. Outro enrolamento do transformador sob ensaio pode também ser ligado em série com o enrolamento de alta-tensão.

4.10.5.2 A seqüência de ensaio para um transformador trifásico consiste em três aplicações monofásicas de tensão de ensaio com os pontos diferentes do enrolamento ligados, de cada vez, à terra. Na Figura 20 do Anexo A são indicados exemplos de ligações de ensaio. Também outros métodos podem ser utilizados.

4.10.5.3 No caso de um transformador de vários enrolamentos, outros enrolamentos ligados em estrela devem, geralmente, ser aterrados no neutro e enrolamentos ligados em triângulo, em um dos vértices.

4.10.5.4 A tensão por espira durante o ensaio atinge valores diferentes, dependendo da ligação de ensaio. A escolha da ligação de ensaio adequada depende das características do transformador e da instalação de ensaio.

4.10.5.5 No caso de transformadores de grande porte, com arranjos complexos de enrolamentos, recomenda-se que todas as ligações entre os enrolamentos, para ensaio, sejam examinadas por fabricante e comprador, por ocasião do contrato, a fim de que o ensaio represente, tão próximo quanto possível, uma combinação realista de solicitações em funcionamento.

4.10.6 Tensão induzida com medição de descargas parciais para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou superior a 362 kV

4.10.6.1 O ensaio é aplicável a todos os enrolamentos com isolamento progressivo; tendo eles espiras em comum (caso dos autotransformadores) ou não.

4.10.6.2 O terminal de neutro do enrolamento sob ensaio deve ser aterrado.

4.10.6.3 Os valores da tensão de ensaio, o tempo de aplicação de cada valor e respectiva seqüência devem estar de acordo com a NBR 5356. Durante a aplicação da tensão de ensaio, deve ser medido o nível de descargas parciais, de acordo com a NBR 5356.

4.10.7 Descargas parciais - Disposições gerais

4.10.7.1 Esta Norma indica dois métodos para medição de descargas parciais:

- a) medição em picocoulombs (pC);
- b) medição em microvolts (μV).

4.10.7.2 A medição deve ser realizada nos terminais de linha, conforme a NBR 5356.

4.10.8 Descargas parciais - Medição e calibração em picocoulombs (pC) (ver Figuras 21-(a) e 21-(b) do Anexo A)

4.10.8.1 Os instrumentos de medição devem permitir a determinação da carga aparente, como definida na NBR 6937, em picocoulombs. Podem ser utilizados os seguintes instrumentos, de acordo com a NBR 6937:

a) instrumentos de banda estreita, de medição de tensão de radiointerferência, com voltímetro a valor quasi-pico, de acordo com a CISPR 16;

b) instrumentos de banda larga, de medição de carga aparente, em picocoulombs, com largura de banda relativamente grande, por exemplo entre 50 kHz e 150 kHz ou mais, com características de resposta, conforme a NBR 6937.

Quando se utilizam instrumentos de medição de banda estreita, deve-se usar frequência de medição, preferivelmente, entre 100 kHz e 300 kHz e não-superior a 500 kHz. Um sistema de medição de banda larga é menos crítico no que se refere à atenuação, como também às respostas a diferentes formas de pulsos. Porém, é mais sensível a perturbações, em instalações de ensaio sem blindagem eletromagnética.

4.10.8.2 A impedância de medição Z_m pode ser instalada das seguintes maneiras:

- a) entre a derivação de ensaio de bucha com repartição capacitiva e seu flange (ver Figuras 21-(a) e 21-(b) do Anexo A);
- b) usando o flange isolado como terminal de medição;
- c) utilizando um capacitor de enrolamento de alta-tensão e ligando Z_m entre o terminal de tensão inferior do capacitor e a terra (ver Figura 21-(b) do Anexo A).

4.10.8.2.1 O equipamento de medição é ligado aos terminais através de cabos coaxiais de impedância própria casada com a do equipamento. A impedância de medição é, neste caso, simplesmente o resultante do casamento da impedância própria do cabo com a impedância de entrada do instrumento de medição. Caso isso não seja possível, deve ser feito acordo entre fabricante e comprador.

4.10.8.2.2 Com a finalidade de se melhorar a relação sinal/ruído do sistema completo de medição, pode ser conveniente fazer uso de circuitos sintonizados, transformadores de pulsos e amplificadores, entre os terminais do objeto sob ensaio e o cabo coaxial. O circuito deve apresentar uma resistência razoavelmente constante, quando visto do lado dos terminais do objeto sob ensaio, através da faixa de frequência usada na medição de descargas parciais.

4.10.8.3 Para evitar as interferências provocadas por perturbações externas:

- a) podem ser utilizados filtros;
- b) devem ser blindados os terminais de linha e ligações sujeitas à alta-tensão do transformador.

Não é obrigatório o registro contínuo de oscilogramas ou fitas magnéticas. As leituras devem ser efetuadas simultaneamente em todos os canais ou, mediante chave seletora, sucessivamente, devendo ser registradas no relatório de ensaio, ao qual é também anexado o diagrama esquemático dos circuitos usados para a calibração e medição.

4.10.8.4 Para calibração, deve ser utilizado um gerador de degrau de tensão, em série com um capacitor de valor baixo, conhecido, C_0 , cujas características satisfaçam aos requisitos da NBR 6937. Para evitar a introdução de erros devidos a capacitâncias parasitas, o capacitor de valor C_0 deve estar próximo ao terminal de alta-tensão a medir e, quando não fizer parte integrante do gerador de pulsos, ligado a este mediante cabo coaxial. A frequência de repetição de pulsos da fonte de calibração deve ser superior a 50 pulsos por segundo e ser medida com um contador de pulsos ou um osciloscópio, durante a calibração.

4.10.8.5 A calibração deve ser efetuada com o circuito de ensaio e com o circuito completo de medição. Uma carga conhecida deve ser injetada entre cada terminal de linha a ser medido e terra. O fator de escala para o circuito de medição deve ser obtido conforme as recomendações da NBR 6937 e também do fabricante dos instrumentos usados.

4.10.8.6 O valor da carga aparente, em picocoulombs, é obtido através da leitura do instrumento e do fator de escala do circuito completo de medição, conforme as recomendações da NBR 6937 e as características do instrumento usado. Deve-se levar em conta, para efeito de correção, a diferença do número de pulsos por segundo entre a calibração e a medição, de acordo com a CISPR 16. As correções correspondentes devem ser anotadas no relatório de ensaio.

4.10.9 Descargas parciais - Medição e calibração em microvolts (μV)

4.10.9.1 Devem ser usados instrumentos de banda estreita, normalizados de acordo com a CISPR 16 ou a ANSI C 63-2, para medição da tensão de radiointerferência, com voltímetro a valor quasi-pico. A frequência de medição deve ser, preferivelmente, 1 MHz. No caso de interferências externas, pode-se utilizar frequência na faixa de 0,85 MHz a 1,15 MHz.

4.10.9.2 As características do circuito de medição são encontradas em 4.10.8.2 e 4.10.8.3.

4.10.9.3 Para a calibração, deve ser utilizado um gerador de tensão senoidal com frequência igual à frequência de medição.

4.10.9.4 A calibração deve ser efetuada com o circuito de ensaio e o circuito completo de medição. Deve-se proceder da seguinte maneira:

- a) aplicar um sinal de, aproximadamente, 100 μV ao terminal sob ensaio, na frequência de medição;
- b) medir a tensão, com o medidor ligado diretamente ao terminal sob ensaio;
- c) medir a tensão, com o mesmo medidor ligado ao ponto do circuito onde ele fica durante a medição;
- d) o fator de escala é a relação entre as medições obtidas de acordo com as alíneas b) e c) acima, respectivamente;

e) deve ser garantido que o fator de escala permaneça válido para a faixa dos valores obtidos no ensaio.

4.10.9.5 O valor das descargas parciais, em μV , deve ser igual ao produto da leitura do instrumento, durante o ensaio, pelo fator de escala.

4.10.10 Descargas parciais - Procedimento após um ensaio malsucedido

No Anexo B, são apresentadas sugestões para procedimento após a realização de um ensaio malsucedido.

4.10.11 Tensão suportável nominal de impulso atmosférico

4.10.11.1 Na execução do ensaio, são admitidas as seguintes variações na forma de impulso especificada na NBR 5356:

- a) valor de crista: $\pm 3\%$;
- b) tempo de frente: $\pm 30\%$;
- c) tempo até o meio valor: $\pm 20\%$;
- d) oscilações na frente do impulso até o ponto correspondente a 50% do valor de crista de, no máximo, 25% do valor de crista;
- e) oscilações de amplitude nas vizinhanças da crista de, no máximo, 5% do valor de crista.

4.10.11.1.1 As polaridades a serem utilizadas são especificadas na NBR 5356. Em certos casos, pode ser difícil ajustar a forma do impulso dentro das tolerâncias fixadas na NBR 5389, para o impulso atmosférico pleno normalizado, devido à baixa indutância ou alta capacitância para terra do enrolamento. A forma resultante do impulso é, então, oscilatória. Nestes casos, mediante acordo entre fabricante e comprador, podem ser estabelecidas tolerâncias mais amplas que as fixadas na NBR 5389. A amplitude de polaridade oposta de um impulso oscilatório não deve exceder 50% da primeira amplitude. Mediante acordo entre fabricante e comprador, o problema da forma do impulso pode ser tratado por métodos alternativos de ligação e aterramento dos terminais, descritos em 4.10.11.2.

4.10.11.2 Para o impulso em terminais de linha, os parâmetros do circuito de ensaio devem ser ajustados para o impulso atmosférico pleno normalizado com o equipamento de corte no circuito, exceto nos casos em que, comprovadamente, o equipamento de corte produz perturbações na forma dos impulsos. Depois disto, não deve mais ser efetuada alteração no circuito, exceto para:

- a) ajustar o espaçamento do equipamento de corte, a fim de evitar centelhamento durante as aplicações de impulsos plenos;
- b) ajustar o equipamento de corte para obter centelhamento dentro do tempo especificado na NBR 7570 durante as aplicações de impulsos cortados.

4.10.11.2.1 A seqüência de impulsos, fixada na NBR 5356, deve ser aplicada sucessivamente a cada um dos terminais de linha do enrolamento ensaiado, salvo quando, nos casos previstos em 4.10.11.3, houver interligação dos terminais. Os terminais não ensaiados do enrolamento e o terminal de neutro, se houver, devem ser aterrados diretamente ou através de uma impedância de baixo valor, como um derivador de medição de corrente, de forma a limitar a tensão neles a 75% da sua tensão suportável nominal de impulso atmosférico.

4.10.11.2.2 O núcleo e o tanque do transformador devem ser aterrados diretamente, exceto quando se quer medir a corrente de impulso através do tanque. Neste caso, um dos terminais do enrolamento sob ensaio deve ser ligado diretamente ao tanque. Os terminais de cada um dos enrolamentos, sempre que possível, devem ser ligados ao tanque, quer diretamente, quer por meio de resistores. A tensão resultante nos terminais não ensaiados não deve exceder 75% da tensão suportável nominal de impulso atmosférico. O tanque deve ter uma única ligação com a terra, através de um resistor de aterramento adequado.

4.10.11.2.3 No caso de um transformador com enrolamento separado, os terminais dos enrolamentos não ensaiados são também aterrados diretamente ou através de impedâncias, de forma que, sob qualquer condição de ensaio, a tensão nos transformadores fique limitada a 75% da sua tensão suportável nominal de impulso atmosférico.

4.10.11.2.4 No ensaio dos terminais de linha de alta-tensão de autotransformadores, os terminais de linha da mesma fase, não ensaiados, podem ser aterrados diretamente quando há especificação do comprador. Caso contrário, o aterramento é feito através de resistores cujos valores não devem ser superiores aos indicados a seguir:

Tensão máxima do equipamento (kV)	Resistência (Ω)
≤ 362	500
550	400
800	300

Nos terminais de linha não ensaiados, não deve aparecer tensão superior a 75% de sua tensão nominal de impulso atmosférico.

4.10.11.2.5 No ensaio de enrolamentos de baixa impedância, é difícil obter-se a forma correta do impulso nos terminais ensaiados. Neste caso, podem ser aplicadas tolerâncias mais amplas, mediante acordo entre fabricante e comprador. É possível, também, simplificar-se o problema, aterrando-se os terminais não ensaiados do enrolamento por meio de resistores. O valor dos resistores não deve exceder 500 Ω e deve ser escolhido de forma a limitar a tensão que aparecer nos terminais a 75% da sua tensão suportável nominal. Como alternativa, mediante acordo por ocasião da ordem de compra, pode ser empregado o método do impulso transferido, descrito na NBR 5456.

4.10.11.3 Quando especificado pelo comprador, o isolamento dos terminais de neutro deve ser verificado por um ensaio de tensão suportável de impulso. A seqüência de ensaio está fixada na NBR 5356. Os terminais dos enrolamentos sob ensaio devem ser aterrados diretamente

ou através de resistor, de forma que, sob qualquer condição de ensaio, a tensão nos enrolamentos fique limitada a 75% da sua tensão suportável nominal de impulso atmosférico. O ensaio deve ser executado por um dos procedimentos seguintes:

- a) aplicar diretamente ao terminal de neutro a sua tensão suportável nominal de impulso atmosférico; os terminais de linha devem estar aterrados diretamente ou através do resistor;
- b) aterrar o terminal de neutro por meio de um resistor; aplicar a um terminal de linha, ou a todos os terminais de linha interligados, uma tensão de ensaio não-superior a 75% da tensão suportável nominal de impulso atmosférico destes terminais; a tensão que aparecer nos terminais do resistor deve ser igual à tensão suportável nominal de impulso atmosférico do neutro.

Nota: Quando o procedimento indicado em b) for utilizado, este ensaio deve preceder o ensaio de impulso atmosférico nos terminais de linha.

4.10.11.4 Quando o enrolamento de baixa-tensão não estiver sujeito, em funcionamento, a surtos atmosféricos provenientes do sistema de baixa-tensão, este enrolamento pode ser ensaiado, mediante acordo entre fabricante e comprador, pelo método do impulso transferido a partir do enrolamento de alta-tensão.

4.10.11.4.1 O emprego deste método justifica-se, também, no caso de um projeto tal que a aplicação de um impulso diretamente ao enrolamento de baixa-tensão poderia resultar em solicitação não-realista dos enrolamentos de tensão mais elevada, particularmente quando um grande enrolamento de regulação estiver fisicamente adjacente ao enrolamento de baixa-tensão.

4.10.11.4.2 Na aplicação deste método, os ensaios no enrolamento de baixa-tensão são executados simultaneamente com os ensaios no enrolamento adjacente de tensão mais elevada. Os terminais do enrolamento de baixa-tensão são aterrados através de resistores de valor tal que a amplitude do impulso transferido entre o terminal de linha e terra ou entre diferentes terminais de linha ou aos terminais de um enrolamento de fase seja tão elevado quanto possível, mas não-superior à tensão suportável nominal de impulso atmosférico. A resistência não deve ser superior a 500 Ω . Os detalhes do procedimento devem ser estabelecidos mediante acordo prévio ao ensaio.

4.10.11.5 Os enrolamentos para ligação-série ou paralelo devem ser ensaiados em ambas as ligações, se qualquer delas tiver tensão máxima do equipamento igual ou superior a 24,2 kV, com tensão de ensaio correspondente ao nível de isolamento de cada ligação. Se a tensão máxima do equipamento do enrolamento for inferior a 24,2 kV, o ensaio deve ser executado somente na ligação-série, salvo quando especificado para ambas as ligações. A ligação nos enrolamentos não ensaiados deve ser a de maior número de espiras.

4.10.11.6 Em transformadores com derivações, a ligação dos enrolamentos sob ensaio deve ser conforme prescrito na NBR 5356. A ligação dos enrolamentos não ensaiados deve ser correspondente à maior tensão.

4.10.11.7 Em transformadores providos de dispositivos de proteção não-lineares, como parte integrante, a operação destes dispositivos normalmente causa diferenças entre os oscilogramas dos impulsos plenos com valor reduzido e com o valor especificado. Um dos procedimentos destinados a mostrar que as diferenças referidas foram causadas pelos dispositivos de proteção consiste em aplicar dois ou mais impulsos plenos com valores reduzidos diferentes e, assim, verificar a tendência das deformações introduzidas por tais dispositivos nos impulsos com o valor especificado. Quando a natureza dos dispositivos de proteção e o projeto do transformador o permitirem, a impedância de tais dispositivos pode ser variada para os impulsos plenos com o valor reduzido e com o valor especificado, como um refinamento na técnica de detecção de defeitos.

4.10.11.8 Devem ser registrados os oscilogramas de tensão e de uma das grandezas indicadas a seguir, salvo especificação diferente nesta Norma:

- a) corrente;
- b) tensão induzida num terminal não diretamente aterrado, pertencente a enrolamento não ensaiado.

Nota: O registro das duas grandezas deve ser feito simultaneamente.

4.10.11.8.1 Na maioria dos casos, um oscilograma da corrente no neutro do enrolamento ensaiado para terra apresenta a melhor sensibilidade para indicação de falha. A corrente do tanque para terra ou a tensão induzida num terminal não diretamente aterrado, pertencentes a enrolamento não ensaiado, são exemplos de grandezas alternativas adequadas, a serem medidas.

4.10.11.8.2 Na aplicação de impulsos cortados, recomenda-se obter, na medida do possível, o mesmo tempo até o corte, tanto para os impulsos com o valor especificado, como para os impulsos com valor reduzido. Recomendam-se os seguintes tempos de varredura:

- a) 5 μ s a 15 μ s para ensaios com impulsos cortados e respectivas correntes;
- b) 50 μ s a 100 μ s para ensaios com impulsos plenos, e 50 μ s a 500 μ s para as respectivas correntes.

4.10.11.8.3 O oscilograma do impulso pleno com valor reduzido deve ter o mesmo tempo de varredura que o impulso pleno com o valor especificado. Todos os impulsos aplicados ao enrolamento devem ser oscilografados (impulsos de tensão e, sempre que possível, a corrente), se o valor do impulso de tensão ultrapassar 50% do valor da tensão de ensaio especificada, para fins de comparação com os demais impulsos aplicados no ensaio.

4.10.11.8.4 Nos relatórios, os oscilogramas dos impulsos aplicados, na seqüência prescrita pela NBR 5356, constituem o registro da aplicação do ensaio de impulso aos terminais do transformador. O registro dos oscilogramas de corrente pode ser feito por qualquer dos métodos prescritos a seguir. A corrente é tomada num resistor adequado; inserido:

- a) entre o tanque aterrado e outro terminal do enrolamento sob ensaio;
- b) entre a terra e um terminal de um enrolamento não ensaiado;
- c) entre a terra e o tanque.

4.10.11.9 As ausências de diferenças significativas entre os registros dos impulsos plenos e cortados normalizados, efetuados com valor reduzido e efetuados com o valor especificado, bem como entre os registros das respectivas correntes, constituem evidência de a isolação ter suportado o ensaio. A interpretação de registros oscilográficos de ensaios, e a distinção entre perturbações erráticas e reais registros de falha requerem muita experiência e perícia. A não-ocorrência de descarga disruptiva no centelhador ou na bucha durante a aplicação de impulsos cortados, tendo o oscilograma indicado corte no impulso de tensão, é sinal evidente de descarga disruptiva, seja no interior do transformador, seja no circuito de ensaio.

4.10.11.9.1 Comparar os oscilogramas:

- a) dos impulsos plenos normalizados com o valor especificado entre si e com o do impulso pleno normalizado com valor reduzido;
- b) das correntes resultantes dos impulsos acima;
- c) dos impulsos cortados com o valor especificado entre si e com os dos impulsos cortados com valor reduzido.

Qualquer diferença não-explicável verificada nas comparações anteriores pode ser indicação de falha no transformador. No caso de impulsos cortados, o registro de corrente no neutro ou qualquer outro registro suplementar apresenta a superposição de fenômenos transitórios devidos à frente do impulso original e ao corte. Deve-se, portanto, levar em conta possíveis variações, mesmo ligeiras, do tempo até o corte. A parte subsequente do oscilograma sofre, então, modificação difícil de ser distinguida do registro de uma falha. Os registros dos dois últimos impulsos plenos normalizados com o valor especificado constituem um critério suplementar de detecção de falha, mas não constituem por si próprios um critério de avaliação do ensaio de impulso cortado.

4.10.11.9.2 Se houver dúvidas sobre a interpretação de discrepâncias nos registros, devem ser feitas, no máximo, três aplicações do tipo de impulso em dúvida no terminal em questão, com o valor especificado, ou deve ser repetido nele o ensaio completo. Se tais discrepâncias persistirem, elas devem ser investigadas.

4.10.11.10 O desprendimento de bolhas de fumaça, através do óleo do transformador, constitui sinal evidente de falha. O aparecimento de bolhas claras pode constituir, ou não, evidência de falha, visto elas poderem ser causadas por ar retido no interior do transformador. Neste caso, a providência de tais bolhas deve ser investigada e o transformador, reensaiado. Ruídos anormais dentro do transformador, durante a aplicação de qualquer dos impulsos, podem ser sinal de falha. Tais ruídos devem ser investigados.

4.10.12 Impulso de manobra

4.10.12.1 Este ensaio deve ser executado de acordo com a NBR 5356. As tensões induzidas nos diferentes enrolamentos do transformador são aproximadamente proporcionais ao seu número de espiras efetivas. A tensão de ensaio deve ser determinada pelo enrolamento de tensão do equipamento mais elevada. Um enrolamento trifásico deve ser ensaiado fase por fase. Os enrolamentos não ensaiados devem ser adequadamente aterrados, durante o ensaio, em um terminal, mas não curto-circuitados. No caso de transformadores monofásicos, deve ser aterrado o neutro do enrolamento ensaiado. Para ensaio de um enrolamento trifásico, o neutro deve ser aterrado, e o transformador ligado de tal forma que nos dois terminais de linha restantes apareça uma tensão de polaridade oposta e com metade da amplitude. Para evitar oscilações que provocam tensões muito superiores à metade da tensão da fase ensaiada, é possível aplicar cargas resistivas nos terminais não ensaiados.

4.10.12.2 Na realização do ensaio de impulso de manobra, em transformadores providos de dispositivos de proteção não-lineares como parte integrante, aplica-se o disposto em 4.10.11.7.

4.11 Estanqueidade e resistência à pressão interna e estanqueidade a quente

4.11.1 Ensaio à temperatura ambiente

Neste ensaio, a pressão é aplicada por meio de ar comprimido ou nitrogênio, secos, agindo sobre a superfície do óleo, e é lida num manômetro instalado entre a válvula de admissão do ar e o transformador. Atingida a pressão especificada para este ensaio na NBR 5356, interromper a entrada do gás, fechando a válvula no tubo de fornecimento. Esta pressão deve manter-se constante durante o tempo de aplicação especificado.

4.11.2 Ensaio a quente

O transformador completamente montado, com óleo em seu nível normal, com todos os seus acessórios, deve ter o enrolamento secundário ligado em curto-circuito; ao enrolamento primário, deve ser aplicada uma tensão suficiente para fazer circular a corrente nominal durante um período consecutivo de 8 h. Neste ensaio, a pressão é aplicada por meio de nitrogênio seco agindo sobre a superfície do óleo, e é lida num manômetro instalado entre a válvula de admissão do nitrogênio e o transformador. Atingida a pressão, fechar a válvula de admissão de nitrogênio.

4.12 Fator de potência do isolamento

O procedimento descrito a seguir aplica-se, apenas, a transformadores imersos em óleo.

4.12.1 O transformador deve estar:

- a) com todas as buchas montadas;
- b) com todos os enrolamentos curto-circuitados;
- c) com a temperatura do óleo e dos enrolamentos tão próxima quanto possível de 20°C.

4.12.1.1 A medição deve ser feita com a frequência de 60 Hz, podendo-se utilizar pontes especiais ou o método do voltímetro e do amperímetro. Quando utilizado o método do voltímetro e do amperímetro, a tensão aplicada deve ser:

- a) entre 2,5 kV e 5 kV para enrolamentos de tensão máxima do equipamento igual a 1,2 kV;
- b) entre 2,5 kV e 10 kV para enrolamentos de tensão máxima do equipamento superior a 1,2 kV.

4.12.2 As medições devem ser realizadas de acordo com a Tabela 1.

4.12.3 Os fatores de correção do fator de potência, em função da temperatura, dependem dos materiais isolantes, de sua estrutura, da umidade, etc. Na Tabela 2, são apresentados os valores do fator de correção k, válidos para transformadores imersos em óleo mineral, utilizados na equação:

$$\cos \phi_{20} = \frac{\cos \phi_t}{k}$$

Onde:

$\cos \phi_{20}$ = fator de potência corrigido para a temperatura de referência (20°C)

$\cos \phi_t$ = fator de potência medido na temperatura de ensaio (t °C)

4.12.3.1 A temperatura a ser considerada é a temperatura média do óleo. Quando o fator de potência do isolamento for medido em temperatura relativamente alta, correspondendo a fatores de correção muito altos, deve-se aguardar o esfriamento do transformador e repetir a medição o mais próximo possível de 20°C.

4.13 Elevação de temperatura

4.13.1 Ensaio de transformadores imersos em óleo

Os ensaios de elevação de temperatura em transformadores imersos em óleo incluem a determinação da elevação de temperatura do topo do óleo e das elevações de temperatura dos enrolamentos.

Notas: a) Para fins de determinação da elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o ar ambiente, é necessário obter-se a temperatura do óleo isolante. Como valor desta, pode-se utilizar:

- o valor da temperatura média do óleo; ou
- valor da temperatura do topo do óleo.

b) O comprador deve indicar na sua especificação qual dos dois valores deve ser adotado; na falta de indicação, a escolha fica a critério do fabricante.

c) Quando, na determinação da elevação de temperatura dos enrolamentos, for necessário utilizar corrente inferior à nominal, de acordo com o prescrito em 4.13.5, recomenda-se utilizar o método da temperatura média do óleo.

d) Durante o ensaio, podem ser medidas as potências requeridas pelos motores de bombas e ventiladores.

Tabela 1 - Ligações para ensaios de fator de potência do isolamento

Transformador de dois enrolamentos (no caso de ensaios sem cabo de blindagem)	
de EAT	para EBT aterrado
de EBT	para EAT aterrado
de EAT e EBT	para terra
Transformador de dois enrolamentos (no caso de ensaios com cabo de blindagem)	
de EAT	para EBT aterrado
de EBT	para EAT aterrado
de EAT e EBT	para terra
de EAT	para terra (EBT ligado à blindagem)
de EBT	para terra (EAT ligado à blindagem)
Transformador de três enrolamentos (no caso de ensaios sem cabo de blindagem)	
de EAT	para EBT ligado à ET e aterrados
de EBT	para ET ligado à EAT e aterrados
de ET	para EAT ligado à EBT e aterrados
de EAT ligado à EBT	para ET aterrado
de EBT ligado à ET	para EAT aterrado
de EAT ligado à EAT	para EBT aterrado
de EAT ligado à EBT e à ET	para terra
Transformador de três enrolamentos (no caso de ensaios com cabo de blindagem)	
de EAT	para terra (EBT ligado à ET e à blindagem)
de EBT	para terra (ET ligado à EAT e à blindagem)
de ET	para terra (EBT ligado à ET e à blindagem)
de EAT	para EBT aterrado (ET ligado à blindagem)
de EBT	para ET aterrado (EAT ligado à blindagem)
de ET	para EAT aterrado (EBT ligado à blindagem)
de EAT ligado à EBT	para ET aterrado
de EBT ligado à ET	para EAT aterrado
de ET ligado à EAT	para EBT aterrado

EAT = enrolamento de alta-tensão

EBT = enrolamento de baixa-tensão

ET = enrolamento terciário

Nota: Nesta Tabela, o termo "cabo de blindagem" significa um ou mais elementos condutores, dispostos de maneira a desviar dos instrumentos de medição as correntes indesejadas.

Tabela 2 - Fatores de correção

Temperatura de ensaio (°C)	Fator de correção - k
10	0,80
15	0,90
20	1,00
25	1,12
30	1,25
35	1,40
40	1,55
45	1,75
50	1,95
55	2,18
60	2,42
65	2,70
70	3,00

4.13.2 Elevação de temperatura do topo do óleo

Deve ser obtida subtraindo-se a temperatura do meio refrigerante da temperatura do topo do óleo quando o transformador for alimentado com as perdas totais. A potência absorvida deve ser mantida num valor constante. Se as perdas totais não puderem ser aplicadas, o ensaio pode ser efetuado com perdas menores, as mais próximas possíveis das totais e não-inferiores a 80% delas. A seguinte correção deve, então, ser aplicada à elevação de temperatura do topo do óleo, assim determinada:

$$\Delta\theta_o = \Delta\theta_r \left(\frac{W_o}{W_{or}} \right)^n$$

Onde:

$\Delta\theta_o$ = elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura do meio refrigerante, com perdas totais, em °C

$\Delta\theta_r$ = elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura do meio refrigerante, com perdas reduzidas, em °C

W_o = perdas totais, em W

W_{or} = perdas reduzidas, em W

n = expoente que depende do tipo da circulação do meio de resfriamento externo, sendo igual a:

- 0,8 para circulação natural do ar;

- 1,0 para circulação forçada do ar ou resfriamento a água.

4.13.3 Temperatura média do óleo

A temperatura média do óleo é determinada como a diferença entre a temperatura do topo do óleo e a metade da queda de temperatura nos trocadores de calor. Em tanques com tubos ou radiadores montados, a queda da temperatura deve ser tomada como a diferença entre as temperaturas no alto e no fundo de um tubo de resfriamento ou elemento de radiador, devendo ser escolhido um tubo de resfriamento ou um elemento de radiador, o mais próximo possível do meio de um lado do tanque.

4.13.4 Elevação de temperatura média do óleo

Deve se obtida subtraindo-se a temperatura do meio refrigerante da temperatura média do óleo, quando o transformador for alimentado com as perdas totais. A potência deve ser mantida constante. Em transformadores de potências nominais iguais ou inferiores a 2500 kVA, com circulação natural do óleo e tanques planos ou corrugados, com tubos ou radiadores montados nos tanques, a elevação de temperatura média é tomada como aproximadamente igual a 0,8 vez a elevação de temperatura do topo do óleo.

4.13.5 Elevação de temperatura dos enrolamentos

4.13.5.1 Conforme indicado na NBR 5356, pode-se utilizar dois métodos para este ensaio:

a) método da variação de resistências, que consiste na determinação da temperatura comparando-se a resistência elétrica do enrolamento, na temperatura a ser determinada, com a sua resistência numa temperatura conhecida;

b) método termométrico, que consiste na determinação da temperatura média do enrolamento por meio de pares termelétricos em contato com a face externa dos enrolamentos.

4.13.5.2 Quando se utilizar a temperatura média do óleo e não for possível fazer circular a corrente nominal no enrolamento sob ensaio, sem provocar, em outro enrolamento, corrente superior a 110% da sua corrente nominal, o ensaio pode ser executado com corrente não-inferior a 90% da corrente nominal, desde que, em nenhum outro enrolamento, seja excedido o valor de 110% da respectiva corrente nominal. Neste caso, a elevação de temperatura dos enrolamentos sobre a temperatura média do óleo é calculada por meio da seguinte fórmula:

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta_t \left(\frac{I_N}{I_t} \right)^n$$

Onde:

$\Delta\theta_N$ = elevação de temperatura do enrolamento sobre a temperatura do óleo, com a corrente nominal, em °C

$\Delta\theta_t$ = elevação de temperatura do enrolamento sobre a temperatura do óleo, com a corrente de ensaio, em °C

I_N = corrente nominal do enrolamento, em A

I_t = corrente de ensaio, em A

m = expoente que depende do tipo da circulação do meio de resfriamento em contato com os enrolamentos, sendo igual a:

- 1,6 para circulação natural ou forçada, não dirigida do óleo;

- 2,0 para circulação forçada do óleo.

4.13.5.2.1 Se as condições anteriores não puderem ser satisfeitas, é necessário acordo entre fabricante e comprador para a realização do ensaio.

4.13.6 Métodos de carga

A critério do fabricante, os métodos de carga efetiva, o método de oposição e o método de curto-circuito descritos em 4.13.6.1 a 4.13.6.3 podem ser aplicados a transformadores imersos em óleo.

4.13.6.1 No método de carga efetiva, um enrolamento do transformador é excitado com tensão nominal, achando-se o outro ligado a uma carga adequada, de forma a circular corrente nominal em ambos os enrolamentos. Este método é o mais preciso de todos, mas seus requisitos em energia são excessivos para transformadores grandes.

4.13.6.2 No método de oposição, o transformador sob ensaio é ligado em paralelo com outro transformador. Ambos são excitados com a tensão nominal do primeiro. Por meio de relações diferentes de tensões, ou de uma tensão injetada, faz-se circular a corrente nominal do transformador sob ensaio (ver Figuras 22 a 27 do Anexo A).

4.13.6.3 No método de curto-circuito, colocar em curto-circuito o enrolamento de alta-tensão ou o de baixa-tensão, e fazer circular no outro enrolamento uma corrente suficiente para dar, nestas condições, as perdas totais correspondentes à temperatura de referência. Manter esta condição até que a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a do meio de resfriamento externo atinja um valor constante. Registrar:

- a) a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura do meio de resfriamento externo;
- b) a elevação de temperatura média do óleo sobre a temperatura do meio de resfriamento externo, quando este método for utilizado.

4.13.6.3.1 Reduzir a corrente no enrolamento ao seu valor nominal e mantê-la constante durante 1 h. Registrar a temperatura da camada superior do óleo ou a temperatura média do óleo, conforme o método utilizado. Desligar o transformador, a circulação de água, a circulação força da e a ventilação. As bombas de óleo podem ser desligadas ou deixadas em funcionamento. Medir a resistência a quente dos enrolamentos, de acordo com o prescrito em 4.13.8.8, para obter, a partir dela, a temperatura média de cada enrolamento.

4.13.6.3.2 A elevação de temperatura de cada enrolamento, referida à tensão, corrente e freqüência nominais, obtida por este método, é a soma da elevação de temperatura do óleo sobre a do meio de resfriamento externo, obtida segundo 4.13.2 ou 4.13.3, com a elevação de temperatura do enrolamento considerado sobre a do óleo, obtida segundo 4.13.5. No caso de transformadores de vários enrolamentos, nos quais mais de dois enrolamentos podem ser submetidos à carga simultaneamente, em operação, os ensaios de elevação de temperatura devem normalmente ser executados sobre os enrolamentos tomados aos pares separadamente. Em certos casos, as potências nominais dos enrolamentos individuais podem excluir o ensaio do transformador com as perdas totais. Para tais casos, deve ser feita a correção de elevação de temperatura do topo do óleo, como indicado em 4.13.2. Quando se tratar da determinação da elevação de temperatura de cada enrolamento em uma combinação de carga especificada tal que, para o enrolamento considerado, resulte carga superior à nominal, pode ser efetuada a correção indicada em 4.13.5. Neste caso, o fabricante pode levar em consideração os efeitos das perdas adicionais, na combinação de carga considerada.

4.13.7 Ensaios de transformadores secos

4.13.7.1 A critério do fabricante, qualquer um dos métodos descritos em 4.13.6.1, 4.13.6.2, ou o método de excitação e perdas em carga independentes, pode ser aplicado a transformadores secos.

4.13.7.2 O método de excitação e perdas em carga independentes aplica-se a transformadores secos, visando à

obtenção das elevações de temperatura dos enrolamentos em dois ensaios independentes, sendo um com aplicação das perdas em carga e outro com as perdas em vazio. As elevações de temperatura dos enrolamentos são obtidas:

- a) T_1 após o aquecimento obtido com a aplicação da corrente nominal do enrolamento, estando o outro enrolamento curto-circuitado;
- b) T_2 após o aquecimento obtido com a aplicação da tensão nominal do enrolamento, estando o outro enrolamento em circuito aberto.

A elevação de temperatura total do enrolamento T é calculada pela seguinte fórmula:

$$T = T_1 \left[1 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1,25} \right]^{0,8}$$

4.13.8 Procedimento para ensaio de elevação de temperatura

4.13.8.1 Os transformadores devem estar completamente montados, com todos os acessórios ao seu funcionamento normal e, quando for o caso, cheios de óleo até o nível marcado. O ensaio deve ser feito num lugar isento de correntes de ar. A temperatura ambiente deve ser medida por meio de vários termômetros ou pares termoeletrônicos, dispostos como indicado a seguir. Eles devem ser protegidos de corrente e irradiação anormal de calor, inclusive de irradiação do próprio transformador. Os erros devidos à demora entre as variações de temperatura do transformador e do ar de resfriamento podem ser evitados se o sistema de medição da temperatura ambiente tiver, aproximadamente, a mesma constante de tempo do transformador. Em caso de não-conhecimento da constante de tempo do transformador, adota-se um valor de, aproximadamente, 2 h. Deve ser considerada como temperatura ambiente a média das leituras feitas nestes termômetros ou pares termoeletrônicos, em intervalos iguais, durante o último quarto da duração do ensaio. A temperatura do ar de resfriamento deve ser a mais constante possível durante o ensaio, especialmente, durante a última quarta parte.

4.13.8.1.1 No caso de resfriamento natural, devem ser colocados pelo menos três termômetros ou pares termoeletrônicos em torno do transformador, a uma distância de 1 m a 2 m e à meia altura dele.

4.13.8.1.2 No caso de resfriamento forçado, se houver um fluxo definido do ar circundante em direção às entradas dos trocadores de calor, sem recirculação apreciável de ar quente, os termômetros ou pares termoeletrônicos devem ser colocados neste fluxo de entrada, à distância suficiente do tanque e das superfícies refrigerantes, para evitar a influência do calor radiante (aproximadamente 1 m a 2 m). Se estas condições não puderem ser cumpridas, as temperaturas devem ser medidas em pontos do transformador, fora dos fluxos de recirculação, de preferência, em um lado sem trocador de calor. Medir a temperatura do topo do óleo por meio de pares termoeletrônicos ou termômetro colocados na respectiva provisão cheia de óleo. Se o tanque não estiver completamente cheio de óleo, a provisão deve ser suficientemente longa, ou achar-se colocada em posição adequada, para assegurar a medição correta da temperatura do topo do óleo. Quando o transformador não

possuir provisão para colocação do termômetro, ou par termoeletrico, deve ser prevista abertura pela qual este pode ser inserido. Neste caso, o termoeletrico ou par termoeletrico deve ser imerso a, no máximo, 5 cm abaixo da superfície situada sob a tampa do transformador. A elevação de temperatura assim determinada não deve exceder o limite fixado na NBR 5356. Deve-se igualmente verificar a temperatura das partes metálicas sujeitas a aquecimentos anormais, adjacentes aos terminais de saída ou aos terminais portadores de corrente.

4.13.8.2 Para medições de temperatura de superfícies, é preferível o uso de par termoeletrico. Quando utilizado com esta finalidade, o par termoeletrico, sempre que possível, deve ser fixado à superfície, de forma a se ter um bom contato térmico.

4.13.8.3 Para transformadores secos, os bulbos dos termômetros devem ser protegidos por almofadas de feltro, de acordo com o prescrito na Figura 28 do Anexo A. Quando estas almofadas impedirem a circulação do ar nos canais de ventilação, ou entre bobinas, recomenda-se o uso de calços de material isolante, de acordo com o prescrito na Figura 29 do Anexo A.

4.13.8.4 Determinar a elevação de temperatura dos enrolamentos pelos métodos da variação da resistência ou termométrico, de acordo com o especificado na NBR 5356. Manter as condições prescritas em 4.13.6, até se atingir um valor constante de elevação de temperatura da superfície do óleo, sobre a temperatura do meio refrigerante. O ensaio deve ser continuado até serem satisfeitos os requisitos de um dos dois métodos seguintes, a) ou b), mediante acordo entre fabricante e comprador:

- a) deve-se ter certeza de que a maior elevação de temperatura não excede o limite fixado na NBR 5356, mesmo se o ensaio for continuado até equilíbrio térmico. As temperaturas devem ser lidas, sempre que possível, durante o funcionamento, bem como após o desligamento da alimentação. O ensaio não deve ser considerado completo, enquanto o incremento na elevação de temperatura não for inferior a 3°C em 1 h. O método indicado na Figura 30 do Anexo A deve ser empregado na determinação da elevação de temperatura final;
- b) deve ser demonstrado que a elevação de temperatura da camada superior do óleo não varia mais de 1 °C, durante 3 h consecutivas. Neste caso, é permitido abreviar o ensaio, usando-se sobrecarga ou restringindo-se o resfriamento no início do ensaio.

4.13.8.4.1 No caso de transformadores com enrolamentos concêntricos e núcleos de eixos verticais, em que dois ou mais enrolamentos idênticos são dispostos um acima do outro, todos estes enrolamentos podem ser ligados em série para o ensaio de elevação de temperatura, mediante acordo entre fabricante e comprador. A elevação de temperatura medida destes enrolamentos ligados em série não deve exceder o limite fixado na NBR 5356.

4.13.8.5 As condições gerais para transformadores imersos em óleo com resfriamento natural, e transformadores imersos em óleo com ventilação forçada são as seguintes:

a) medir a temperatura do meio refrigerante que é a temperatura ambiente, medida de acordo com o prescrito em 4.13.8.1. Se esta temperatura estiver compreendida entre 10°C e 40°C, não se aplica correção de ensaio;

b) em caso de necessidade, desde que se conheçam fatores de correção adequados e haja acordo entre fabricante e comprador, o ensaio pode ser feito fora destes limites de temperatura.

4.13.8.6 As condições gerais para transformadores imersos em óleo com resfriamento à água são as seguintes:

a) deve-se medir a vazão e as temperaturas de entrada e de saída da água de resfriamento;

b) a temperatura do meio refrigerante é, nesse caso, a temperatura de entrada da água de resfriamento, e esta deve ser considerada a média de, pelo menos, três leituras tomadas em intervalos aproximadamente iguais, não-superiores a 1 h, durante o último quarto de duração do ensaio. Estas temperaturas devem estar entre 20°C e 30°C, salvo acordo diferente entre fabricante e comprador, no qual seja fixada a correção a ser aplicada.

4.13.8.7 As condições gerais para transformadores com circulação forçada do óleo são as seguintes:

a) deve-se medir a vazão e as temperaturas de entrada e de saída do óleo;

Nota: Este procedimento não é necessário quando o equipamento para circulação forçada do óleo é integrante do próprio transformador.

b) se o resfriamento do óleo for feito pelo ar, aplicar as prescrições de 4.13.8.5;

c) se o resfriamento do óleo for feito pela água, aplicar as prescrições de 4.13.8.6.

4.13.8.8 A temperatura média de um enrolamento através do método de variação da resistência é determinada pela equação:

$$\theta = \frac{R_{\theta}}{R_0} (k + \theta_0) - k$$

Onde:

R_0 = resistência a frio, em Ω , determinada de acordo com o prescrito em 4.2

R_{θ} = resistência a quente, em Ω

θ_0 = temperatura correspondente a R_0 , em °C

θ = temperatura correspondente a R_{θ} , em °C

k = 234,5 para o cobre e 225,0 para o alumínio

4.13.8.8.1 Deve ser efetuada uma série de medições de resistência entre dois terminais do enrolamento, de modo que fique assegurada aproximação precisa até o desligamento. O levantamento desta série de medidas deve ser feito o mais rapidamente possível após o desliga-

mento da fonte de energia e depois de cessado o efeito indutivo, de acordo com o disposto em 4.2.5. Com os valores de resistência obtidos, traçar a curva dessa resistência em função do tempo, a qual deve ser extrapolada para dar o valor da resistência no instante do desligamento do transformador. Devem ser obtidas, pelo menos, três leituras dentro dos primeiros 4 min no primeiro par de terminais em que é efetuada a medição. A mesma curva pode servir, mediante acordo entre fabricante e comprador, de orientação para obter-se a resistência no instante de desligamento dos outros enrolamentos de fase do transformador, uma vez que se tenha obtido deles um valor de resistência no menor intervalo de tempo possível, de preferência dentro de 4 min após o desligamento da fonte de energia.

4.13.8.8.2 Se necessário, o ensaio de elevação de temperatura pode ser retomado, fazendo-se circular a corrente nominal durante 1 h, de forma que as primeiras leituras em qualquer grupo de enrolamentos possam ser completadas dentro dos 4 min exigidos. A determinação gráfica da resistência no instante do desligamento pode ser efetuada pelos métodos indicados a seguir:

- a) a determinação gráfica da resistência, no instante de desligamento, por meio de coordenadas retangulares, é feita de acordo com a Figura 31 do Anexo A. O valor da resistência R deve ser determinado no gráfico em intervalos de tempo iguais Δt , obtendo-se na curva os pontos A, B, C, ..., de ordenadas R_1, R_2, R_3, \dots , respectivamente. Determinar as variações de resistência:

$$\Delta R_1 = (R_1 - R_2), \Delta R_2 = (R_2 - R_3), \dots$$

Tomar o eixo das resistências R como eixo das abscissas, determinar os pontos P_1, P_2, P_3, \dots , cujas ordenadas são respectivamente $\Delta R_1, \Delta R_2, \dots$, e abscissas R_2, R_3, R_4, \dots . Pelos pontos P_1, P_2, P_3 , traçar a reta auxiliar HG, que representa a variação da resistência até a primeira medida R_1 e, portanto, permite a determinação do ponto inicial R' da curva resistência-tempo sobre o eixo da resistência. Sobre a reta HG, determinar o ponto P_0 , de abscissa R_1 . Pelo ponto P_0 , traçar uma paralela ao segmento P_1R_1 , cuja interseção com o eixo das resistências é o ponto R_0 , resistência no instante de desligamento da energia;

Nota: Em certos casos, onde é evidente a tendência da curva, pode-se extrapolar esta diretamente, sem a utilização da reta auxiliar HG, simplificando-se, dessa forma, este método.

- b) para determinação gráfica da resistência no instante do desligamento, por meio de escalas semi-logarítmicas, colocar a diferença entre a resistência medida e a resistência calculada à temperatura média do óleo, no instante do desligamento na escala logarítmica e o tempo na escala linear. A resistência no instante de desligamento da fonte de energia é determinada traçando-se uma linha reta através dos pontos no gráfico e extrapolando-se até tempo zero;
- c) a resistência no instante do desligamento pode ser determinada por regressão, conforme o Anexo C.

4.14 Ensaio de curto-circuito

4.14.1 Considerações gerais

A metodologia a seguir descrita aplica-se à execução de ensaios para verificação da capacidade de resistência a curto-circuito de transformadores monofásicos ou trifásicos com dois enrolamentos. No caso de ensaios em transformadores com mais de dois enrolamentos ou autotransformadores, as condições dos ensaios devem ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

4.14.2 Condições do transformador antes dos ensaios de curto-circuito

4.14.2.1 Os ensaios de curto-circuito devem ser realizados em um transformador novo em condições de entrada em serviço, salvo acordo diferente entre fabricante e comprador.

4.14.2.2 A montagem de acessórios, que não tenham influência no comportamento do transformador durante o curto-circuito (tais como, equipamento removível de resfriamento), é desnecessária.

4.14.2.3 Antes da execução dos ensaios de curto-circuito, o transformador deve ser submetido aos ensaios de rotina especificados na NBR 5356. O relatório completo dos ensaios de rotina deve ser aprovado por fabricante e comprador antes do início dos ensaios de curto-circuito.

4.14.2.4 No caso de enrolamentos providos de derivações, a reatância e, se solicitada, a resistência devem ser medidas antes da execução dos ensaios nas posições de derivação em que o ensaio de curto-circuito deve ser realizado. A reprodutividade das medições da resistência e reatância deve ser melhor que $\pm 0,2\%$, salvo acordo diferente entre laboratório, fabricante e comprador. A medição do valor da reatância deve ser efetuada com corrente de valor tão próximo quanto possível da corrente nominal, salvo se a medição for efetuada por meio de ponte, que permite uma melhor precisão da medida.

4.14.2.5 Ao serem iniciados os ensaios de curto-circuito, a temperatura média dos enrolamentos deve estar entre 0°C e 40°C .

4.14.3 Valor e duração da aplicação da corrente de ensaio de curto-circuito para transformadores de dois enrolamentos

O valor e a duração da corrente de curto-circuito devem ser calculados de acordo com a NBR 5356 ou indicados mediante acordo entre fabricante e comprador. Os valores simétricos e de crista da corrente de ensaio não devem diferir mais de 10% e 5% dos valores especificados respectivos.

4.14.4 Verificação dos valores de crista e simétrico da corrente de ensaio

Para verificação da corrente de crista I_{cr} , e da corrente simétrica I, a corrente deve ser registrada por um oscilógrafo (ver Figura 32 do Anexo A).

4.14.5 Procedimento para ensaio de curto-circuito em transformadores de dois enrolamentos

4.14.5.1 Para obter-se a corrente de ensaio prescrita na

NBR 5356, a tensão em vazio da fonte utilizada no ensaio deve ser superior à tensão nominal do enrolamento alimentado. A corrente de ensaio deve ser ajustada por meio de reatâncias e resistências, de modo que a amplitude da corrente e a relação X/R do circuito atendam ao disposto na NBR 5356.

4.14.5.1.1 O curto-circuito dos terminais do enrolamento do transformador pode ser efetuado antes ou depois da alimentação do outro enrolamento (ver Figura 33 do Anexo A). Caso o curto-circuito seja aplicado após a alimentação do transformador, a tensão em vazio da fonte de ensaio não deve exceder 115% da tensão nominal do enrolamento. No caso de curto-circuito a ser aplicado antes da alimentação do transformador, a alimentação deve ser ligada ao enrolamento mais distante do núcleo, sendo curto-circuitado o enrolamento mais próximo do núcleo, a fim de evitar-se a saturação do núcleo magnético do transformador, a qual pode provocar um fluxo excessivo de corrente de magnetização superimposta à corrente de curto-circuito durante os primeiros ciclos.

4.14.5.1.2 Para transformadores com enrolamentos em camadas ou transformadores com enrolamentos concêntricos, a aplicação do curto-circuito antes da alimentação deve ser usada, apenas, mediante acordo entre fabricante e comprador. Recomenda-se efetuar cada aplicação da corrente de curto-circuito de modo que a componente contínua da corrente de ensaio tenha polaridade invertida na aplicação subsequente, seja ela de calibração ou de solicitação de ensaio propriamente dita. Quando, apesar da inversão de polaridade, for observada deformação da corrente de ensaio no oscilograma, é necessário desmagnetizar-se o transformador. Antes da medição da reatância, recomenda-se efetuar a desmagnetização do transformador.

4.14.5.2 Para obter-se o valor de crista da corrente de ensaio como disposto na NBR 5356 no enrolamento de fase sob ensaio, o instante de chaveamento deve ser ajustado por meio de uma chave de fechamento síncrono. O instante de chaveamento é função do fator $k\sqrt{2}$ e da relação X/R do circuito de ensaio, conforme mostrado na expressão seguinte:

$$k = 1 + [e^{-(\phi + \pi/2) R/X}] \text{ sen } \phi$$

Sendo:

$$\phi = \text{arctg } \frac{X}{R} - \theta$$

Onde:

θ = representação do ângulo de chaveamento, expresso em radianos, em relação ao zero da tensão

4.14.5.2.1 Para obtenção da máxima assimetria de corrente nos enrolamentos de uma fase, o chaveamento deve ser efetuado no instante em que a tensão nos enrolamentos dessa fase passa por zero.

Notas: a) Para enrolamentos ligados em estrela, a máxima assimetria é obtida efetuando-se o chaveamento quando a tensão de fase passa por zero. O fator k do valor de crista da corrente I pode então ser determinado a partir dos oscilogramas das correntes de linha.

b) Para enrolamentos ligados em triângulo, a condição de máxima assimetria é obtida efetuando-se o chaveamento quando a tensão de linha passa por zero. Um dos métodos para determinar-se o fator k consiste em fazer uma aplicação preliminar com corrente reduzida, efetuando-se o chaveamento na crista da tensão de linha, sendo então o fator k determinado a partir do oscilograma das correntes de linha. Outro método consiste em efetuar-se o chaveamento quando a tensão entre fases passa por zero e medir-se as correntes de linha com transformadores de corrente cujos secundários devem ser ligados de forma a obterem-se no oscilograma as correntes de fase.

c) Para transformadores ligados em estrela-ziguezague pertencentes à categoria I, com regulação de tensão do tipo fluxo constante, nos quais $x/r \leq 3$ (x, r são as componentes reativa e resistiva de impedância de curto-circuito do transformador, respectivamente), as três fases devem ser chaveadas simultaneamente sem o uso de chave de fechamento síncrono. Para transformadores com ligação estrela-ziguezague não enquadrados nas condições acima, o método de chaveamento deve ser objeto de acordo entre laboratório, fabricante e comprador.

4.14.5.3 Para transformadores trifásicos, a fonte de ensaio deve ser trifásica, desde que seja atendido o disposto na NBR 5356. Se isso não for possível, pode ser utilizada uma fonte de ensaio monofásica, como está descrito abaixo. Para enrolamentos ligados em triângulo, a fonte de ensaio monofásica deve ser ligada entre dois vértices do triângulo, e a tensão durante o ensaio deve ser igual à observada entre fases durante um ensaio trifásico (ver Figura 34 do Anexo D). Para enrolamentos ligados em estrela, a tensão da fonte de ensaio monofásica deve ser aplicada entre um dos terminais de linha e os outros dois interligados. Neste caso, a tensão durante o ensaio deve ser igual a $\sqrt{3}/2$ vezes a tensão de linha durante um ensaio trifásico (ver Figura 34 do Anexo A).

Notas: a) Para enrolamentos ligados em estrela com isolamento progressivo, é necessário verificar se o isolamento do neutro é suficiente para suportar a tensão que aparece no neutro durante a execução de um ensaio monofásico.

b) Se, no caso de enrolamentos ligados em estrela, a capacidade da fonte for insuficiente para realizar o ensaio monofásico descrito acima, e o terminal de neutro for acessível, mediante acordo entre fabricante e comprador, podem ser executados ensaios monofásicos entre fase e neutro.

4.14.6 Número de aplicações

4.14.6.1 Para transformadores monofásicos das categorias I e II, o número de aplicações é três, sendo duas aplicações com duração de 0,25 s e uma aplicação de longa duração, com o tempo especificado na NBR 5356. Salvo especificação diferente, cada aplicação deve ser efetuada em uma posição diferente do comutador de derivações: uma aplicação na posição correspondente à maior relação de tensões de derivação, uma aplicação na posição da derivação principal e uma aplicação na posição correspondente à menor relação de tensões de derivação.

4.14.6.2 Para transformadores trifásicos pertencentes às categorias I e II, o número total de aplicações é nove (três

por fase), sendo seis aplicações (duas por fase) com duração de 0,25 s e três aplicações (uma por fase) de longa duração, com o tempo especificado na NBR 5356. Salvo especificação diferente, para cada fase com derivações são efetuadas aplicações numa posição diferente do comutador de derivações: para uma aplicação nas fases externas, três aplicações na posição correspondente à maior relação de tensões de derivação, para a fase intermediária, três aplicações na posição da derivação principal, e, para a outra fase externa, três aplicações na posição correspondente à menor relação de tensões de derivação.

4.14.6.3 Para transformadores da categoria III, o número de aplicações, a sua respectiva duração e a posição do comutador de derivação nas diversas aplicações sempre constituem objeto de acordo entre fabricante e comprador.

4.14.6.4 No número de aplicações, não devem ser consideradas aplicações de calibração e de ajuda preliminar, efetuadas com menos de 75% da corrente de ensaio. Estas aplicações são normalmente necessárias para verificar-se o funcionamento correto das instalações de ensaio no que diz respeito ao instante de estabelecimento, ajuste de corrente, amortecimento e duração da aplicação.

4.14.7 Detecção de defeitos e avaliação dos resultados do ensaio de curto-circuito

4.14.7.1 Antes da execução dos ensaios de curto-circuito, devem ser efetuadas medições e ensaios conforme 4.14.2, e o relé de gás (Buchholz), se existir, deve ser inspecionado. Essas medições e ensaios são usados como referência para a constatação de defeitos.

4.14.7.2 Durante cada aplicação (incluindo aplicações preliminares), devem ser levantados os seguintes registros oscilográficos:

- a) tensão aplicada aos terminais do transformador;
- b) corrente no enrolamento alimentado (ver Notas de 4.14.5.3);
- c) corrente no enrolamento secundário (serve para indicar a ocorrência de saturação do núcleo);
- d) corrente no tanque para terra (serve para indicar a ocorrência de defeitos internos).

Nota: Podem ser utilizados métodos adicionais de detecção de defeitos. Entre esses métodos, estão o uso de bobinas para medição do fluxo parasita radial e ruídos, medição da corrente de excitação e aplicação de impulso de baixa-tensão.

4.14.7.3 Após cada aplicação, deve-se examinar os oscilogramas registrados durante a aplicação, inspecionar o relé de gás e medir a reatância de curto-circuito.

Notas: a) Para a detecção de defeitos, podem, ainda, ser usados: medição de resistência, oscilogramas de ensaios de impulso à baixa-tensão (oscilogramas de surtos recorrentes), para comparação com oscilogramas obtidos no estágio inicial, e um ensaio em vazio (para detecção de curtos-circuitos entre espiras).

b) Diferenças entre os oscilogramas registrados antes e depois dos ensaios podem servir como critério de detecção de defeitos. É importante observar, durante as aplicações sucessivas, possíveis mudanças na reatância medida após cada ensaio, que podem indicar mudança progressiva ou tendência a um valor estável.

4.14.7.4 Após a conclusão dos ensaios, o transformador e o relé de detecção de gás, se houver, devem ser inspecionados. Os resultados das medições de reatância de curto-circuito e os oscilogramas levantados durante as diferentes etapas dos ensaios devem ser examinados com vistas à indicação de possíveis anomalias durante os ensaios, especialmente qualquer indicação de variação da impedância de curto-circuito. A partir desta etapa do ensaio, os procedimentos para transformadores das categorias I, II e III são os que se encontram em 4.14.7.4.1 e 4.14.7.4.2.

4.14.7.4.1 Para transformadores das categorias I e II

Os ensaios de rotina devem ser repetidos. Os ensaios dielétricos, de rotina, devem ser repetidos com 75% da tensão de ensaio correspondente ao nível de isolamento especificado, salvo acordo entre fabricante e comprador, para adoção de valor mais elevado. A parte ativa do transformador deve então ser retirada do tanque para inspeção de núcleo e enrolamentos, a fim de revelar eventuais defeitos visíveis, tais como mudanças de posição de ligações que podem pôr em perigo a operação segura do transformador, embora este tenha suportado os ensaios de rotina. Considera-se que o transformador suportou os ensaios de curto-circuito, se:

- a) primeiro, ele suportou a repetição dos ensaios de rotina;
- b) segundo, os resultados dos ensaios de curto-circuito, as medições durante os ensaios de curto-circuito e a inspeção da parte ativa fora do tanque não revelaram defeitos;
- c) terceiro, a diferença entre a reatância de curto-circuito medida após os ensaios e a medida no estado original não for superior a:
 - 2% para transformadores com bobinas circulares concêntricas; contudo, quando o condutor do enrolamento de baixa tensão for de fita metálica, mediante acordo entre fabricante e comprador, podem ser adotados valores mais elevados, porém não superiores a 4% para transformadores com tensão de curto-circuito igual ou superior a 3%;
 - 7,5% para transformadores com bobinas não-circulares concêntricas e com tensão de curto-circuito igual ou superior a 3%; o valor de 7,5% pode ser reduzido, mediante acordo entre fabricante e comprador, porém não a valor inferior a 4%.

Nota: Para transformadores com bobinas não-circulares concêntricas, com tensão de curto-circuito inferior a 3%, a variação máxima na reatância não pode ser especificada de forma genérica; para estes transformadores, o conhecimento prático de certos tipos de construção conduz à

aceitação de uma variação $(22,5 - 5 U_2)\%$, sendo U_2 a tensão de curto-circuito em porcentagem.

d) se as três condições, citadas nas alíneas a), b) e c), para se considerar o transformador aprovado no ensaio, tiverem sido satisfeitas, o transformador é recolocado no estado original, repetindo-se, antes da sua expedição, os demais ensaios de rotina necessários para comprovar a sua aptidão para operação em serviço. Se qualquer das três condições não tiver sido satisfeita, pode ser necessário desmontar o transformador, tanto quanto for preciso, para estabelecer a causa da variação de condições constatada.

4.14.7.4.2 Para transformadores da categoria III

Mediante acordo entre fabricante e comprador, a repetição dos ensaios de rotina, normalmente executada nesta etapa, pode ser postergada para depois da inspeção visual da parte ativa. Os ensaios dielétricos, de rotina, devem ser repetidos com 75% da tensão de ensaio correspondente ao nível de isolamento especificado, salvo acordo entre fabricante e comprador, para adoção de valor mais elevado. A parte ativa do transformador deve, então, ser retirada do tanque, para inspeção visual de núcleo e enrolamentos, a fim de revelar eventuais defeitos visíveis, tais como mudanças de posição de ligações que podem pôr em perigo a operação segura do transformador, embora este tenha suportado os ensaios de rotina. Considera-se que o transformador suportou os ensaios de curto-circuito, se:

- a) primeiro, os resultados do ensaio de curto-circuito, as medições durante o ensaio de curto-circuito e a inspeção visual da parte ativa fora do tanque não revelaram defeitos;
- b) segundo, ele suportou a repetição dos ensaios de rotina;
- c) se qualquer das duas condições, citadas nas alíneas a) e b), para se considerar o transformador aprovado no ensaio, não tiver sido satisfeita, pode ser necessário desmontar o transformador, tanto quanto for preciso, para estabelecer a causa da variação de condições constatada.

4.15 Medição da impedância de seqüência zero

4.15.1 A impedância de seqüência zero deve ser medida na freqüência nominal do transformador entre os terminais de linha, curto-circuitados, de um enrolamento ligado em estrela ou zigzag e o terminal de neutro. Essa impedância deve ser expressa em ohms por fase e é dada por $3 U/I$, onde U é a tensão de ensaio e I , a corrente de ensaio. A corrente $I/3$, em cada fase, deve ser indicada no relatório de ensaio. Deve-se verificar se a corrente na ligação do neutro é compatível com sua capacidade de condução.

4.15.2 No caso de transformador com um enrolamento adicional ligado em triângulo, o valor da corrente de ensaio deve ser tal que a corrente, que circula nesse enrolamento, não seja excessiva, tomando-se em consideração o tempo de aplicação.

4.15.3 Se a condição de equilíbrio de ampères-espiras não for satisfeita no sistema de seqüência zero, por exemplo, no caso de um transformador estrela-estrela sem enrolamento triângulo adicional, a tensão aplicada não deve exceder a tensão nominal entre fase e neutro. A corrente no terminal de neutro e o tempo de aplicação devem ser limitados para evitar elevação excessiva de temperatura das partes metálicas.

4.15.4 No caso de transformadores com mais de um enrolamento ligado em estrela e neutro acessível, a impedância de seqüência zero depende de ligação utilizada, devendo os ensaios a serem efetuados constituir objeto de acordo entre fabricante e comprador.

4.15.5 As medições, em enrolamentos com derivações, devem ser efetuadas na derivação principal. Medições em outras derivações podem ser efetuadas mediante acordo entre fabricante e comprador.

4.15.6 Autotransformadores com terminal de neutro destinado a ser ligado permanentemente à terra devem ser tratados como transformadores com dois enrolamentos separados ligados em estrela.

4.15.7 Um circuito de medição é constituído pelo enrolamento-série e pelo enrolamento comum, e o outro circuito de medição, pelo enrolamento comum somente. As medições devem ser efetuadas com corrente não-superior à diferença entre as correntes nominais do lado de baixa- e alta-tensão.

Notas: a) Quando não existir o equilíbrio de ampères-espiras, a relação entre a tensão e a corrente geralmente não é linear.

b) A impedância de seqüência zero depende da disposição relativa entre enrolamentos e partes magnéticas. As medições efetuadas em enrolamentos diferentes podem, assim, apresentar resultados não-concordantes.

4.15.8 As ligações que devem ser empregadas para a medição da impedância de seqüência zero dependem do tipo de ligação e do número de enrolamentos do transformador; no Anexo D, está indicado o tipo de ligação a ser adotado nos ensaios, e, no Anexo A, as respectivas Figuras 35 a 42.

4.16 Acessórios

4.16.1 Indicador externo de nível de óleo

Movimentar o ponteiro até atingir a marcação de nível mínimo do mostrador, para se verificar a operação do contato. Esta operação pode ser verificada, através da medição da continuidade elétrica do circuito de contato, com um ohmímetro ou dispositivo sinalizador.

4.16.2 Indicador de temperatura do óleo

Imergir, em banho de óleo aquecido, o elemento sensor do indicador sob ensaio e o de um termômetro a álcool. Agitar o óleo e registrar as leituras de ambos, após a estabilização da temperatura, e compará-las. Esta comparação deve ser efetuada nos quatro pontos da escala, correspondentes a 1/4, 1/2, 3/4 e 4/4 da graduação máxima. A verificação da atuação dos contatos é efetuada quando

da passagem do ponteiro pelos valores previamente ajustados. Esta constatação pode ser feita com o auxílio de um ohmímetro ou dispositivo sinalizador.

4.16.3 Relé detector de gás tipo Buchholz ou equivalente - Verificação da atuação dos contatos

4.16.3.1 Em relés providos de botão de acionamento mecânico das bóias, a verificação da atuação dos contatos de alarme e desligamento é efetuada através do acionamento manual do referido botão.

4.16.3.2 Em relés não providos de botão de acionamento mecânico das bóias, a verificação da atuação dos contatos de alarme e desligamento é efetuada escoando-se o óleo do relé com as válvulas anterior e posterior a ele fechadas. Após este procedimento, o volume de óleo do relé deve ser restabelecido, a fim de se verificar a operação inversa de atuação dos contatos.

4.16.3.3 Alternativamente, a atuação do contato de alarme pode ser verificada injetando-se ar, lentamente, no relé, através do registro de ensaio, utilizando-se uma bomba de ar ou outro dispositivo adequado. A verificação de atuação do contato de alarme deve ocorrer quando o volume de ar injetado atingir o nível indicado no visor.

4.16.4 Indicador de temperatura do enrolamento

4.16.4.1 Aplicar as prescrições de 4.16.2 para a verificação da escala e operação dos contatos.

4.16.4.2 Para a calibração do dispositivo da imagem térmica, aplicar na resistência de aquecimento um valor de corrente que corresponda à condição de operação do transformador para a qual é disponível o gradiente de temperatura óleo-enrolamento, e ajustar o valor da resistência de calibração num valor que corresponda à temperatura desejada. O fabricante deve registrar os dados de calibração para os diversos estágios de resfriamento previstos no projeto do transformador.

4.16.5 Comutador sem tensão

O funcionamento do comutador sem tensão é normalmente verificado durante a realização dos ensaios de relação de tensões e resistência elétrica do enrolamento. Verificar a correspondência entre a indicação de cada posição do comutador e a relação de tensões medida. Caso o comutador possua contato de bloqueio contra acionamento indevido, a sua atuação deve ser verificada através de um ohmímetro ou dispositivo sinalizador.

4.16.6 Ventilador

Acionar o dispositivo de comando manual e observar a partida do ventilador, o seu sentido de rotação e fluxo de ar. Durante o funcionamento, observar se há ocorrência de vibração anormal. Após a desenergização, observar o tempo de queda de rotação, constatando o correto funcionamento dos mancais e balanceamento da hélice.

4.16.7 Bomba de óleo

Verificar o posicionamento de montagem da bomba, de acordo com o sentido do fluxo desejado. Energizar a bomba e observar sua partida e o indicador de circulação do

óleo. Durante o funcionamento, verificar se há ocorrência de vibração anormal. Quando houver medidor de vazão, comparar o valor indicado com a vazão nominal da bomba de óleo.

4.16.8 Indicador de circulação de óleo

Sendo conhecido o sentido do fluxo de óleo, verificar a correta indicação deste aparelho. A verificação da atuação do contato auxiliar é efetuada através de um ohmímetro ou dispositivo sinalizador.

4.16.9 Dispositivo para alívio de pressão

Quando o dispositivo for do tipo válvula, verificar a atuação do contato auxiliar através de um ohmímetro ou dispositivo sinalizador.

4.16.10 Comutadores de derivações em carga

Depois da montagem completa do comutador de derivações em carga no transformador, o fabricante deste deve executar os seguintes ensaios em 100 % da tensão nominal de alimentação dos auxiliares, exceto o ensaio da alínea b):

- a) oito ciclos de operação completos, com o transformador desenergizado;
- b) um ciclo de operação completo com o transformador desenergizado, a 85% da tensão nominal de alimentação dos auxiliares;
- c) um ciclo de operação completo com o transformador energizado, em vazio, sob tensão e frequência nominais;
- d) dez comutações envolvendo a derivação principal, as duas derivações superiores e as duas derivações inferiores, com corrente a mais próxima possível da corrente nominal do transformador, achando-se um enrolamento curto-circuitado.

Nota: Nestes ensaios não deve ocorrer falha.

4.17 Medição do nível de ruído

Deve ser executada conforme a NBR 7277.

4.18 Medição de harmônicos na corrente de excitação

É considerada ensaio especial e deve ser executada de comum acordo entre fabricante e comprador.

4.19 Medição da potência absorvida pelos motores de bombas de óleo e ventiladores

É considerada ensaio especial e deve ser executada de comum acordo entre fabricante e comprador.

4.20 Medição dos gases dissolvidos no óleo isolante

Deve ser realizada de acordo com a NBR 7070.

4.21 Medição do nível de tensão de radiointerferência

Deve ser realizada conforme a CISPR 16.

4.22 Ensaios de verificação das pinturas externa e interna de transformadores

4.22.1 Espessura

O ensaio de espessura da pintura deve ser feito conforme a NBR 10443.

4.22.2 Aderência

O ensaio de aderência da pintura deve ser feito conforme a NBR 11003.

4.22.3 Outros ensaios

Todos os demais ensaios devem ser executados como referenciados na NBR 11388.

4.22.4 Umidade

O ensaio de umidade deve ser feito conforme a ASTM D 1735.

4.22.5 Impermeabilidade

O ensaio de impermeabilidade deve ser feito conforme a ASTM D 3515.

4.22.6 Brisa marítima

O ensaio de brisa marítima deve ser feito conforme a ASTM D 1014.

4.23 Regulação e rendimento

4.23.1 Regulação

4.23.1.1 Determinar, de forma aproximada, a regulação de um transformador de dois enrolamentos, por cálculo, com base nos valores medidos em conformidade com esta Norma, para um dado fator de potência da carga, pelas seguintes equações:

a) para carga indutiva:

$$\text{reg} = \sqrt{(r + p)^2 + (x + q)^2} - 1 \quad (1)$$

b) para carga capacitiva:

$$\text{reg} = \sqrt{(r + p)^2 + (x - q)^2} - 1 \quad (2)$$

Onde:

p = fator de potência da carga

$$q = \sqrt{1 - p^2}$$

$$r = \frac{r\%}{100} \quad (\text{ver 4.9.1.10})$$

$$x = \frac{x\%}{100} \quad (\text{ver 4.9.1.10})$$

Nota: Os valores obtidos pelas equações (1) e (2) devem ser multiplicados por 100, para se obter a regulação percentual.

4.23.1.2 Maiores informações sobre cálculo da regulação com maior grau de precisão e cálculo para transformadores de três enrolamentos podem ser encontradas na NBR 8153.

4.23.2 Rendimento

O rendimento é calculado pela equação:

$$\begin{aligned} N &= \frac{\text{saída}}{\text{entrada}} = \frac{\text{entrada} - \text{perdas}}{\text{entrada}} = 1 - \frac{\text{perdas}}{\text{entrada}} = \\ &= 1 - \frac{\text{perdas}}{\text{saída} + \text{perdas}} = 1 - \frac{W}{p + W} \end{aligned}$$

Onde:

N = rendimento

W = perdas totais, em kW, correspondentes à potência fornecida pelo transformador, determinadas pela soma das perdas em vazio e das perdas em carga, à temperatura considerada

P = potência fornecida pelo transformador, em kW

Nota: Salvo indicação em contrário, o rendimento deve ser determinado para as condições nominais e fator de potência no secundário igual a 1.

ANEXO A - Figuras

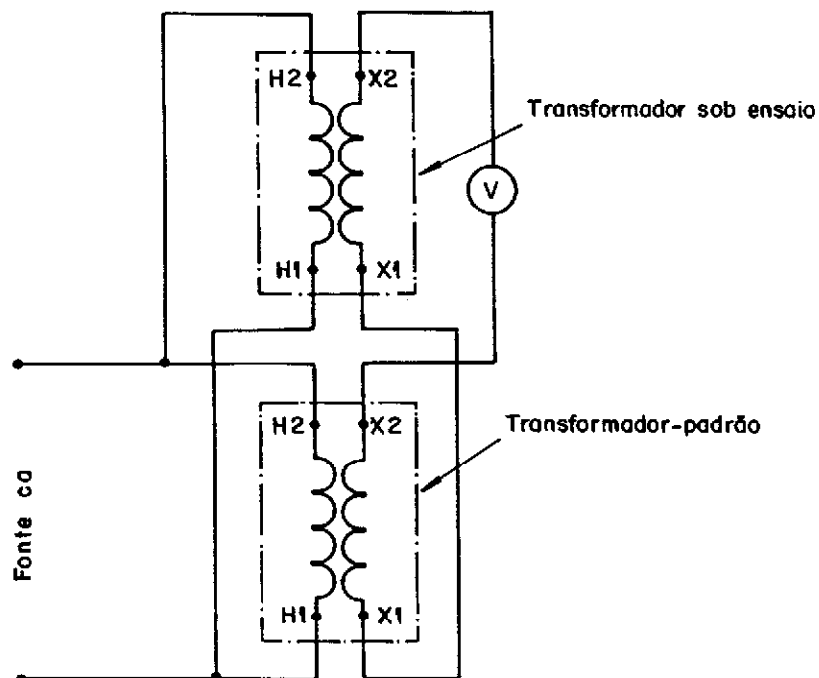


Figura 1 - Diagrama de ligações para determinação da relação de tensões pelo método do transformador-padrão, com voltímetro ligado para medir a diferença entre as duas tensões secundárias

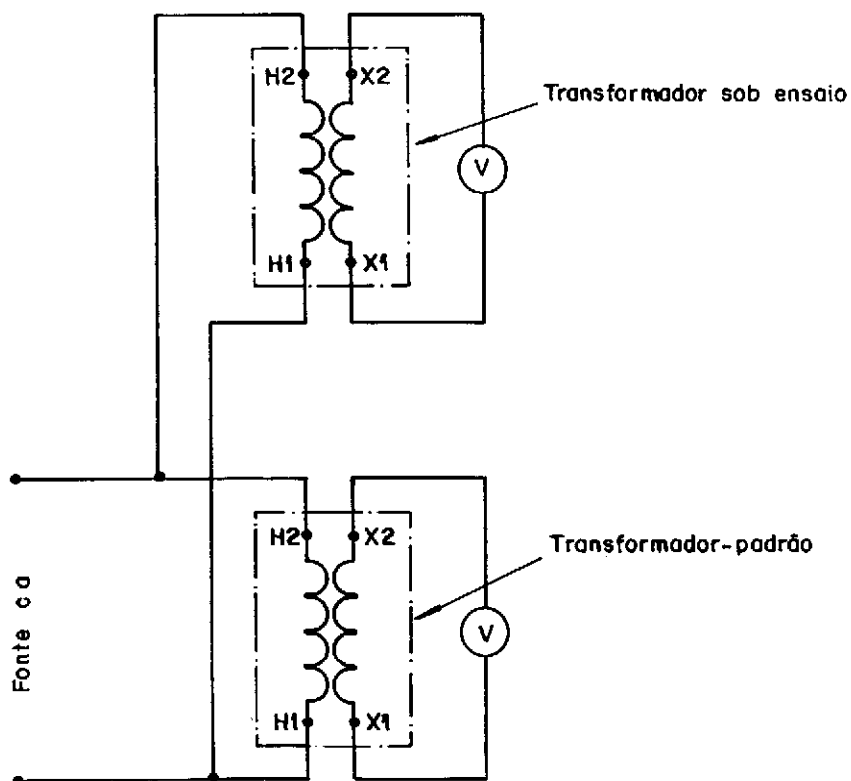


Figura 2 - Diagrama de ligações para determinação da relação de tensões pelo método do transformador-padrão, com voltímetros ligados para medir as duas tensões secundárias

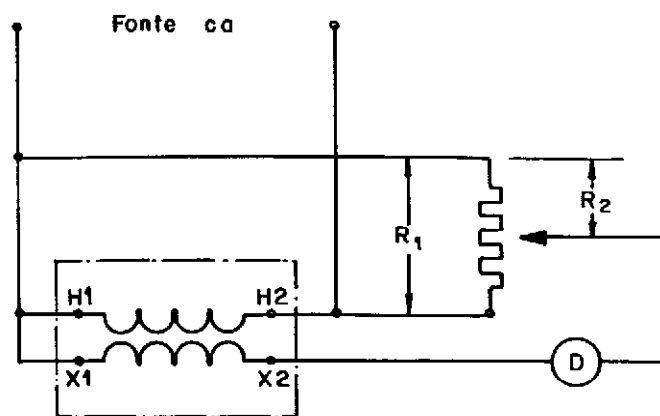


Figura 3 - Diagrama de ligações para determinação da relação de tensões pelo método potenciométrico

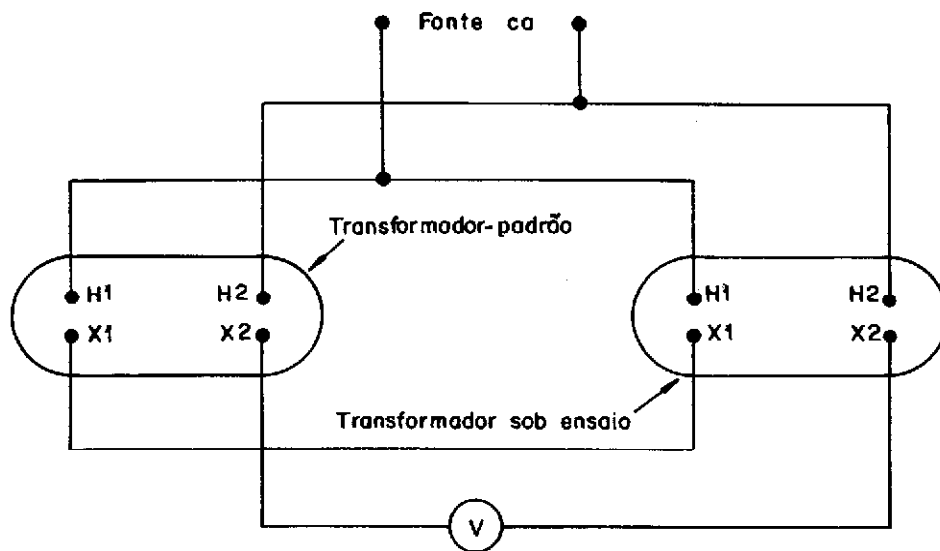


Figura 4 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade por comparação com um transformador-padrão

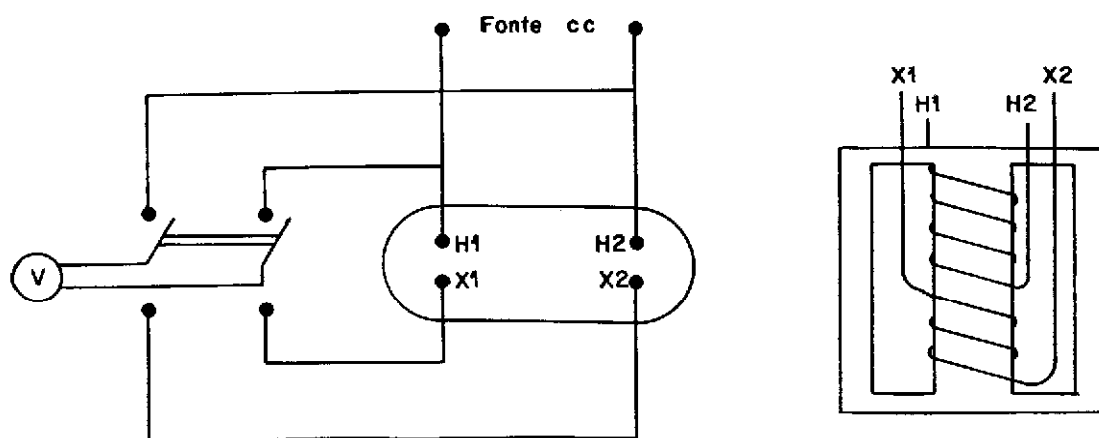


Figura 5 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade por golpe indutivo, com corrente contínua (polaridade subtrativa)

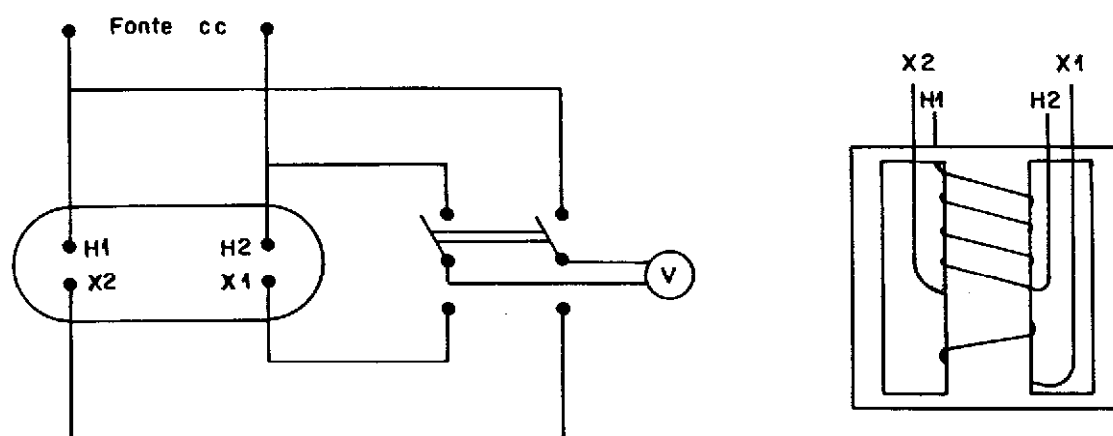


Figura 6 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade por golpe indutivo, com corrente contínua (polaridade aditiva)

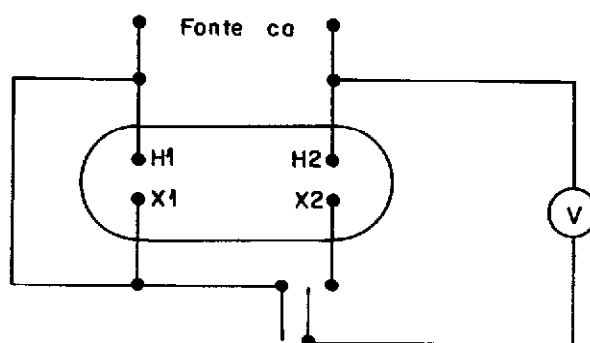


Figura 7 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade pelo emprego de corrente alternada

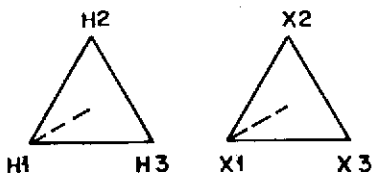
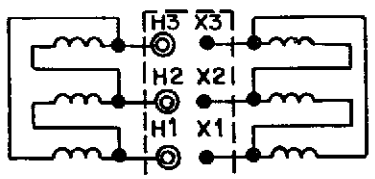
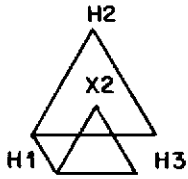
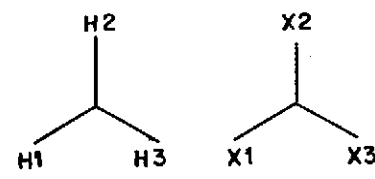
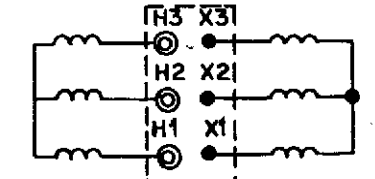
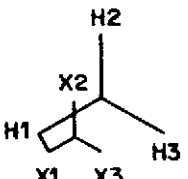
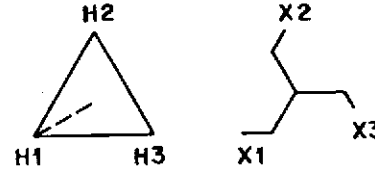
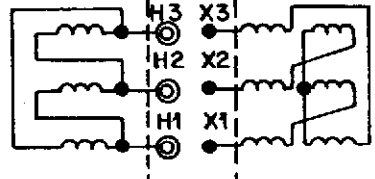
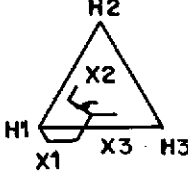
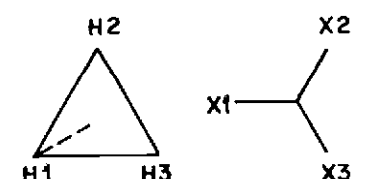
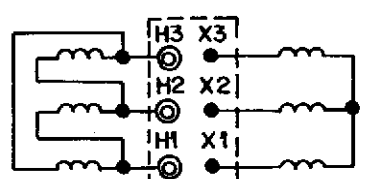
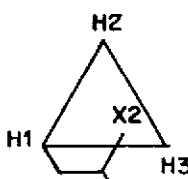
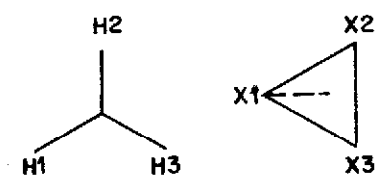
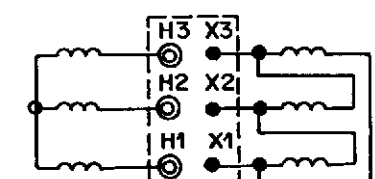
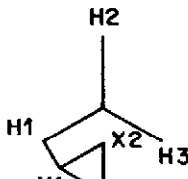
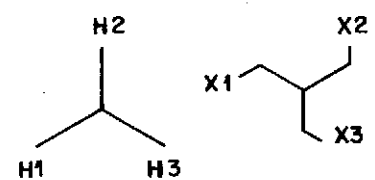
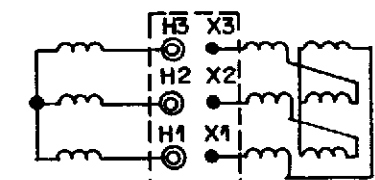
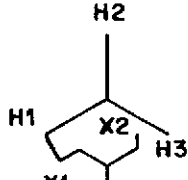
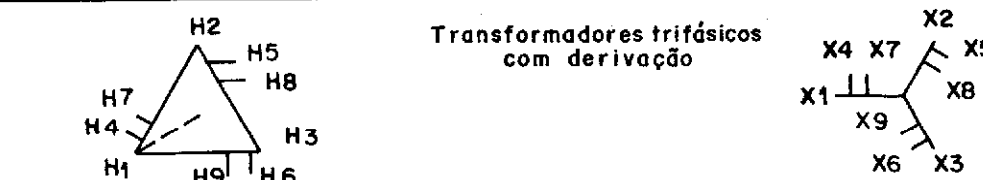
	Deslocamento angular	Diagrama de ligações	Medição de verificação
Grupo 1 - Deslocamento angular 0°	 <p>Ligação triângulo-triângulo</p>		 <p>Ligar - H1 a X1 Medir - H2 X2; H3 X2; H1 H2; H2 X3; H3 X3</p>
	 <p>Ligação estrela-estrela</p>		 <p>Relações de tensões (1) H2 X3 = H3 X2 (2) H2 X2 < H1 H2 (3) H2 X2 < H2 X3 (4) H2 X2 = H3 X3</p>
	 <p>Ligação triângulo-ziguezague</p>		
Grupo 2 - Deslocamento angular 30°	 <p>Ligação triângulo-estrela</p>		 <p>Ligar - H1 a X1 Medir - H3 X2; H3 X3 H1 H3; H2 X2; H2 X3</p>
	 <p>Ligação estrela-triângulo</p>		 <p>Relações de tensões (1) H2 X2 = H3 X3 (2) H3 X2 < H1 H3 (3) H2 X2 < H2 X3 (4) H2 X2 < H1 H3</p>
	 <p>Ligação estrela-ziguezague</p>		
	 <p>Transformadores trifásicos com derivação</p>		

Figura 8 - Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais de tensão, para ligações de transformadores trifásicos

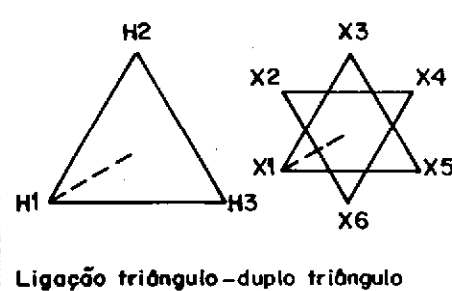
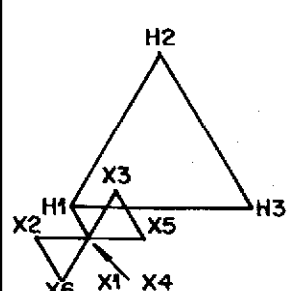
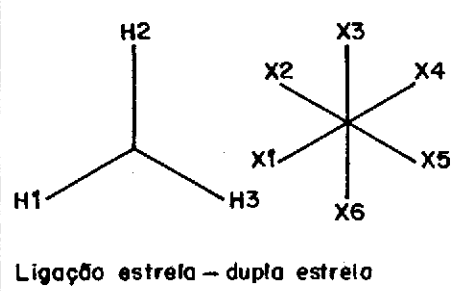
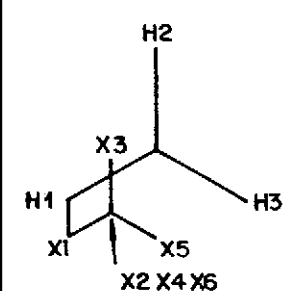
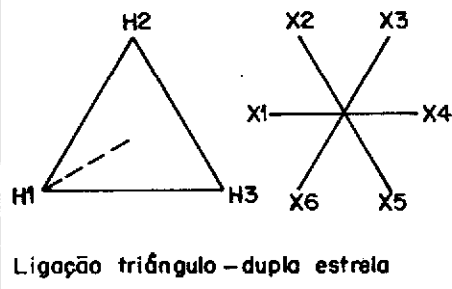
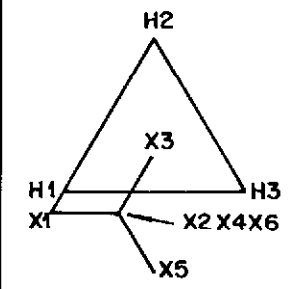
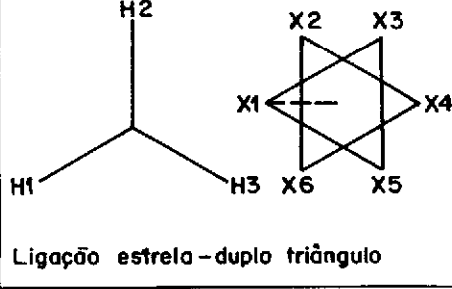
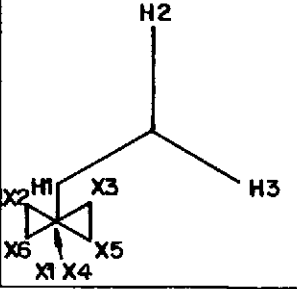
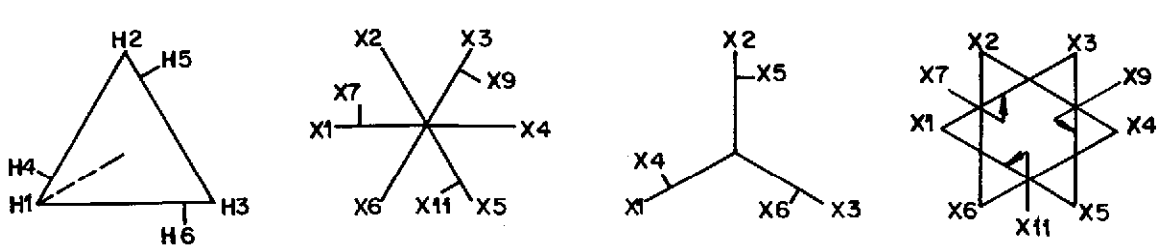
	Deslocamento angular	Medição de verificação	
Grupo 1 - Deslocamento angular 0°	 <p>Ligação triângulo-duplo triângulo</p>		<p>Ligar - H1 a X1 a X4 Medir - H2 X3; H1 H2; H2 X3; H2 X6; H3 X3; H2 X2; H2 X5; H3 X2</p> <p>Relações de tensões</p> <p>(1) H2X5 = H3X3 (4) H2X6 = H3X2 (2) H2X3 < H1 H2 (5) H2X6 > H1 H2 (3) H2X3 < H2 X5 (6) H2X2 < H2 X6</p>
	 <p>Ligação estrela-dupla estrela</p>		<p>Ligar - X2 a X4 a X6 H1 a X1 Medir - H2X3; H3X3; H1 H2; H2 X5</p> <p>Relações de tensões</p> <p>(1) H2X5 = H3X3 (2) H2X3 < H1 H2 (3) H2X3 < H2X5</p>
Grupo 2 - Deslocamento angular 30°	 <p>Ligação triângulo-dupla estrela</p>		<p>Ligar - X2 a X4 a X6 H1 a X1 Medir - H3X3; H3X5; H1 H3; H2X3; H2X5</p> <p>Relações de tensões</p> <p>(1) H3X3 = H3X5 (2) H3X3 < H1 H3 (3) H2X3 < H2 X5</p>
	 <p>Ligação estrela-duplo triângulo</p>		<p>Ligar - H1 a X1 a X4 Medir - H3X3; H3X5; H1 H3; H2X3; H2 X5; H3 X2; H3X6; H2 X2; H2 X6;</p> <p>Relações de tensões</p> <p>(1) H3X3 = H3X5 (4) H3X2 = H3 X6 (2) H3X3 < H1 H3 (5) H3X2 > H1 H3 (3) H2X3 < H2 X5 (6) H2X2 < H2 X6</p>
Transformador hexafásico com derivação			
			

Figura 9 - Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais de tensão, para ligações de transformadores hexafásicos

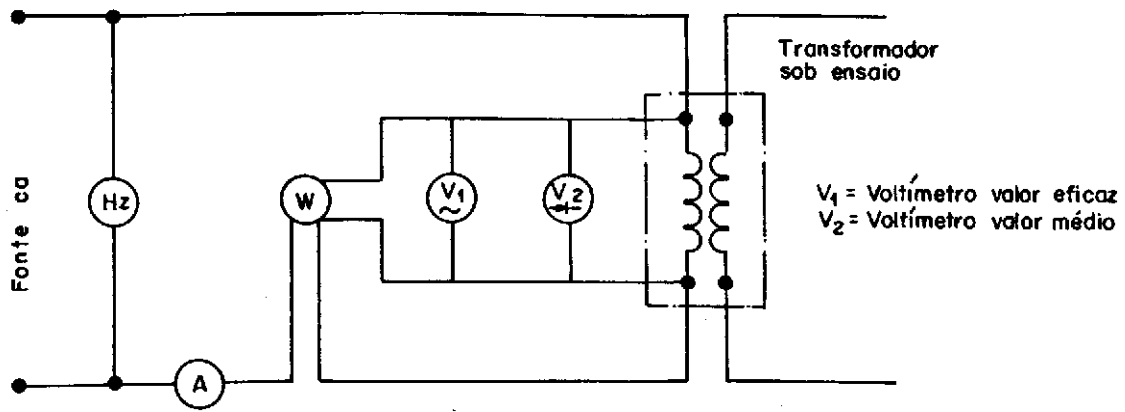


Figura 10 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores monofásicos, sem transformadores para instrumentos

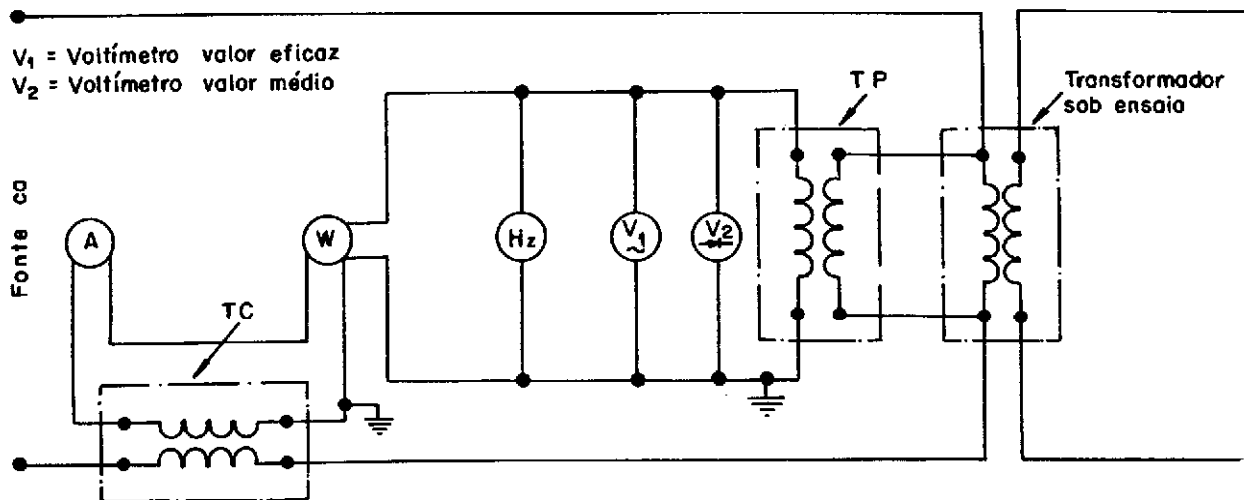


Figura 11 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores monofásicos, com transformadores para instrumentos

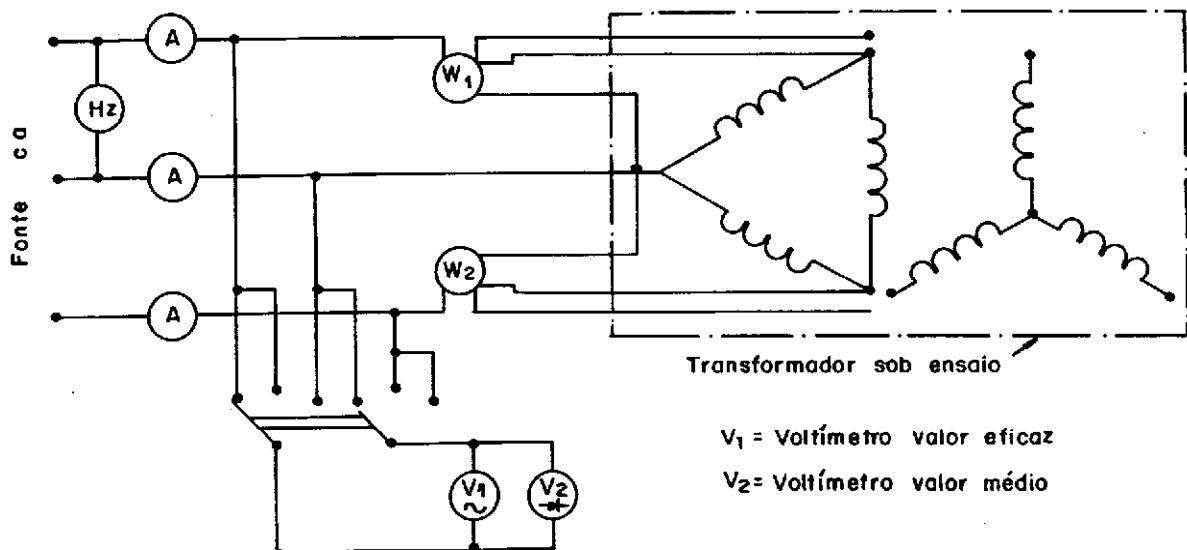


Figura 12 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores trifásicos, pelo método de dois wattímetros

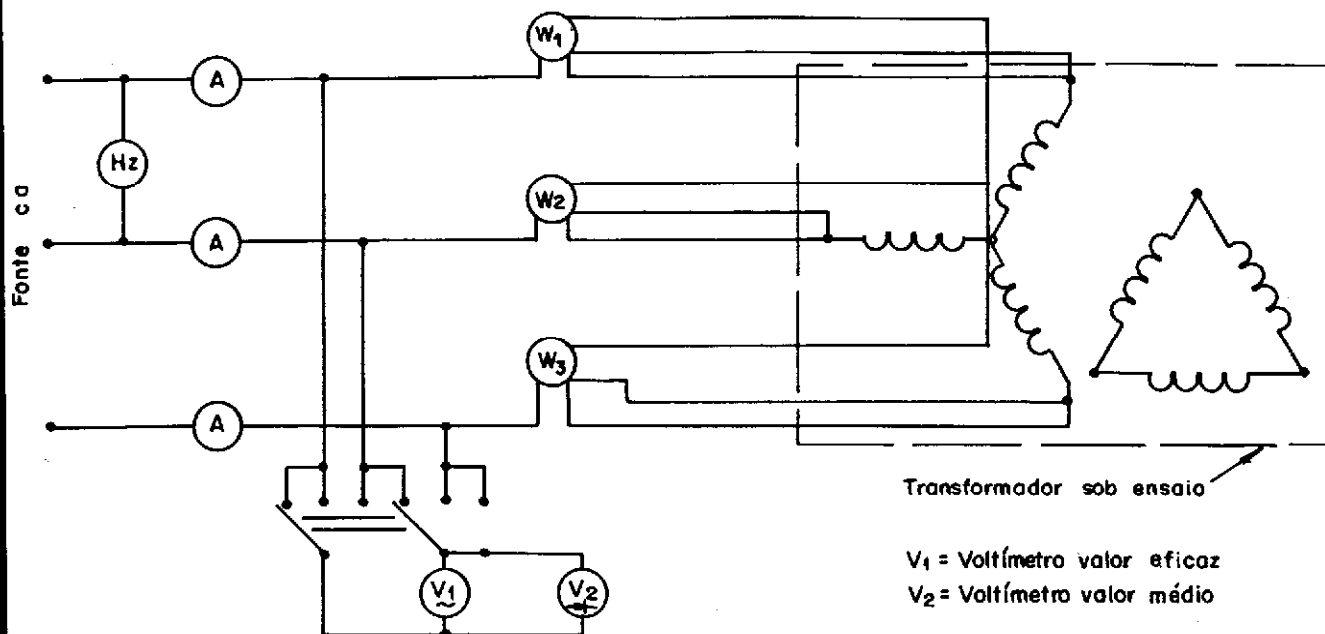


Figura 13 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores trifásicos, de neutro acessível, pelo método de três wattímetros

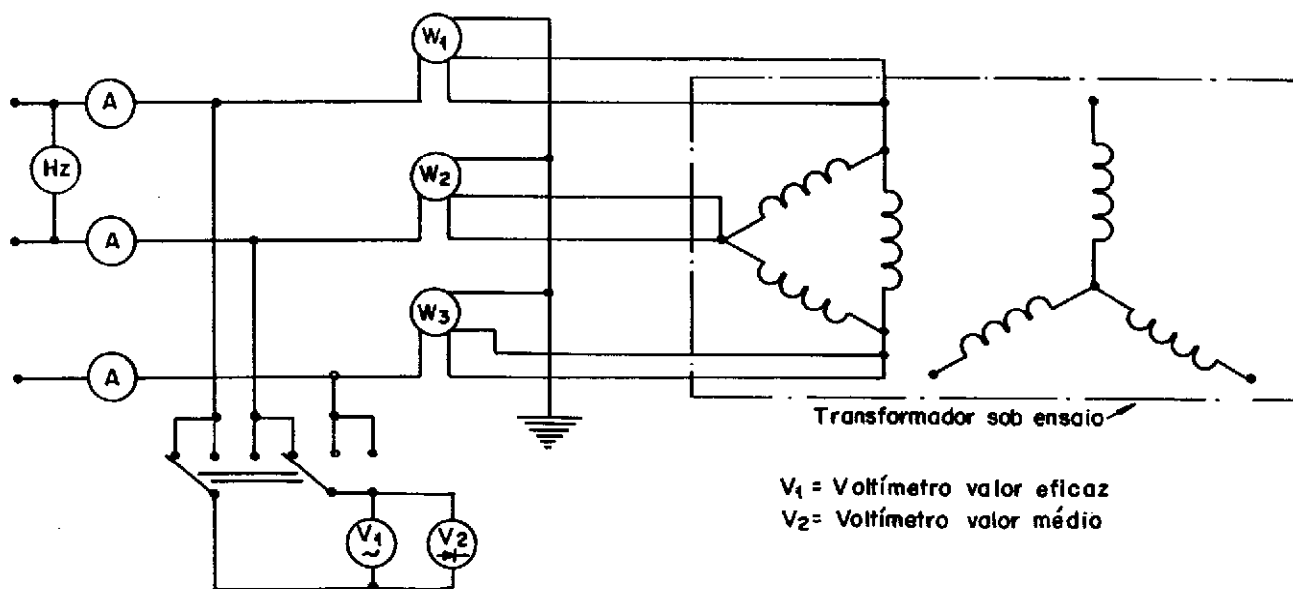


Figura 14 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores trifásicos, pelo método de três wattímetros, usando um neutro de wattímetro artificial

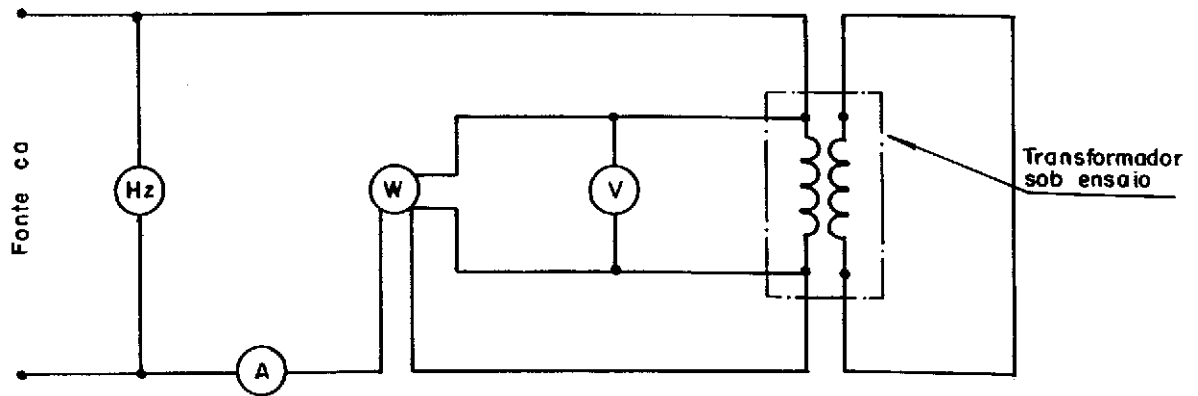


Figura 16 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de transformadores monofásicos de dois enrolamentos

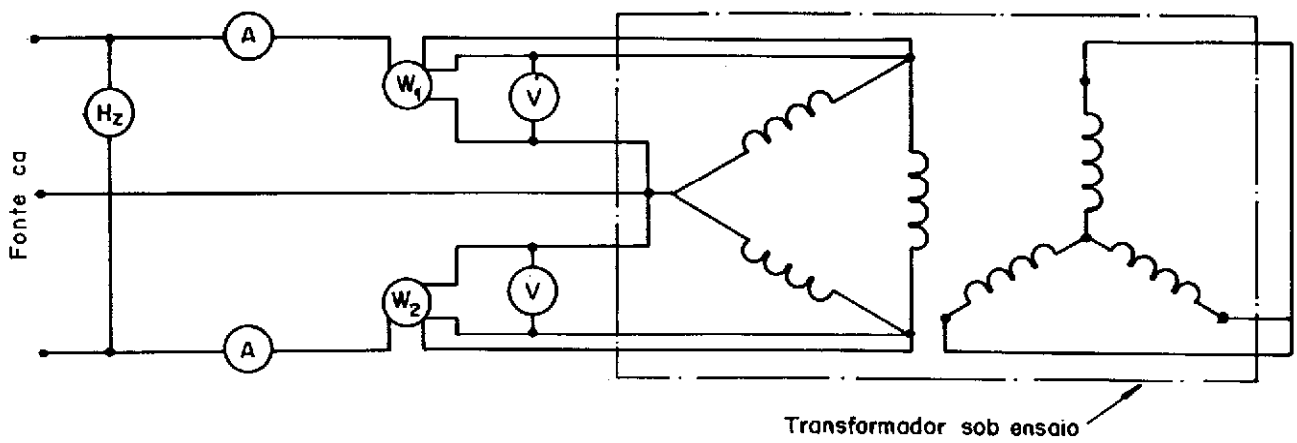


Figura 17 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de transformadores trifásicos

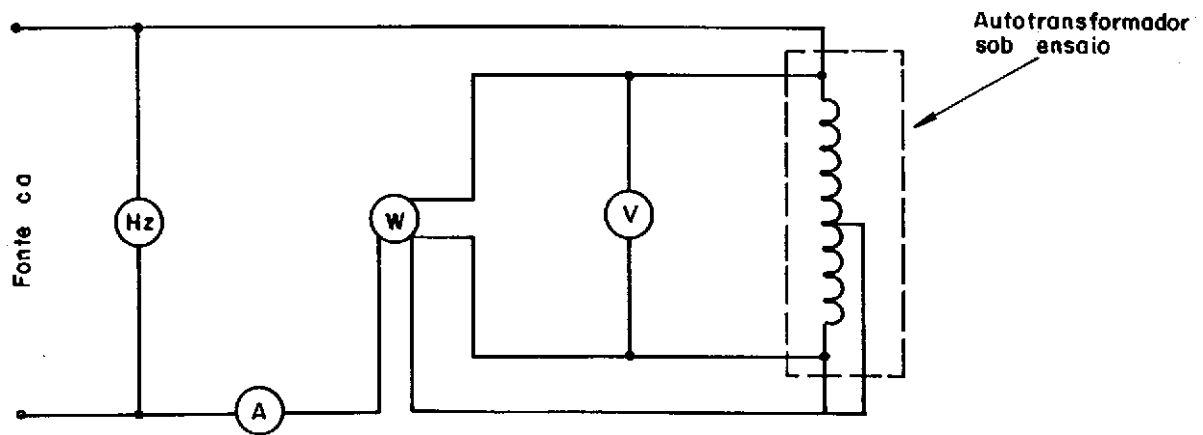


Figura 18 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de autotransformadores monofásicos

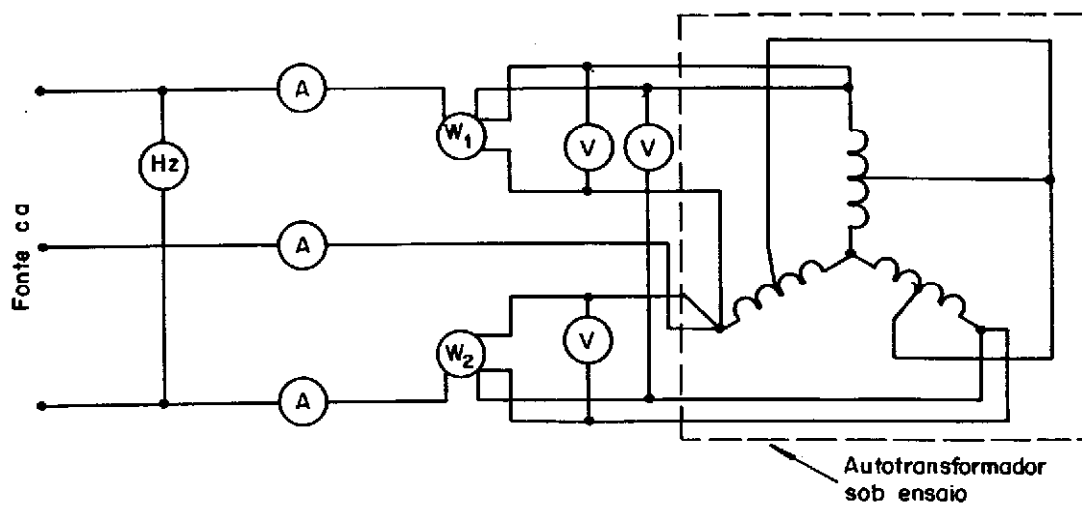


Figura 19 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de autotransformadores trifásicos

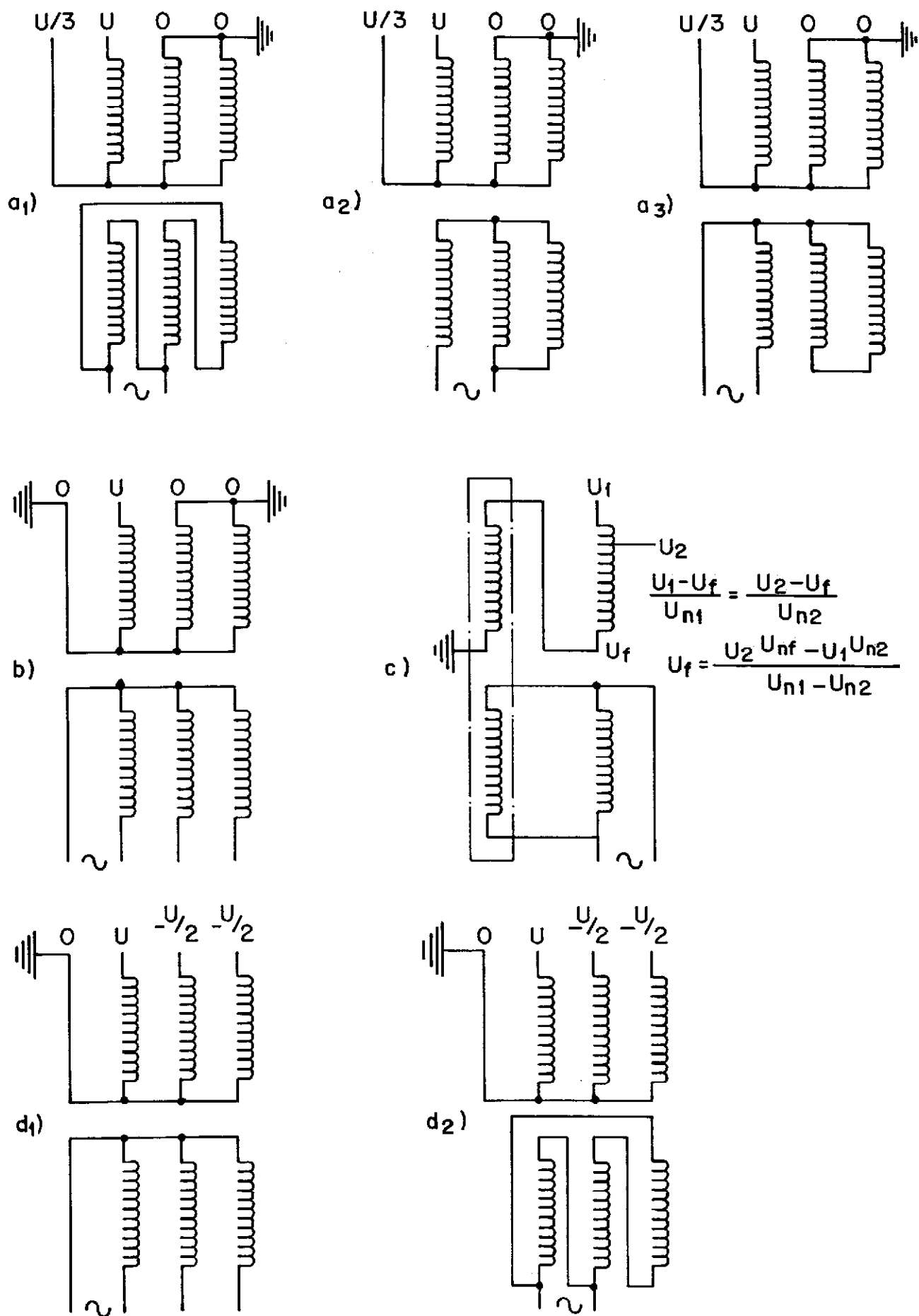


Figura 20 - Ligações para ensaio monofásico de tensão induzida em transformadores com enrolamento progressivo

Notas referentes à Figura 20:

- a) Esta ligação pode ser utilizada quando o neutro for projetado para suportar pelo menos um terço da tensão U . São indicadas, na Figura, três ligações diferentes do gerador ao enrolamento de baixa-tensão. Somente o circuito a1) é aplicável a transformadores que possuem colunas não bobinadas (transformadores de núcleo envolvente).
- b) Esta ligação é aplicável e recomendada a transformadores trifásicos com colunas não bobinadas para o retorno do fluxo que atravessa a coluna da fase sob ensaio. Se houver um enrolamento ligado em triângulo, este deve ser aberto durante o ensaio.
- c) Esta ligação mostra um transformador de reforço auxiliar que fornece uma tensão de polarização U_i no terminal de neutro de um autotransformador sob ensaio. As tensões nominais dos enrolamentos do autotransformador são U_{n1} e U_{n2} e as tensões de ensaio correspondentes, U_1 e U_2 . Esta ligação pode também ser utilizada para um transformador trifásico que não possua colunas não bobinadas, cujo isolamento do neutro é projetado para menos de um terço da tensão U .
- d) Observar que, como nessas ligações resultam tensões entre fases iguais a 1,5 vez a tensão entre fase e neutro, isto pode acarretar, eventualmente, a impossibilidade em manter espaçamentos externos adequados entre as buchas, quando se trata de transformadores com tanques de dimensões reduzidas.

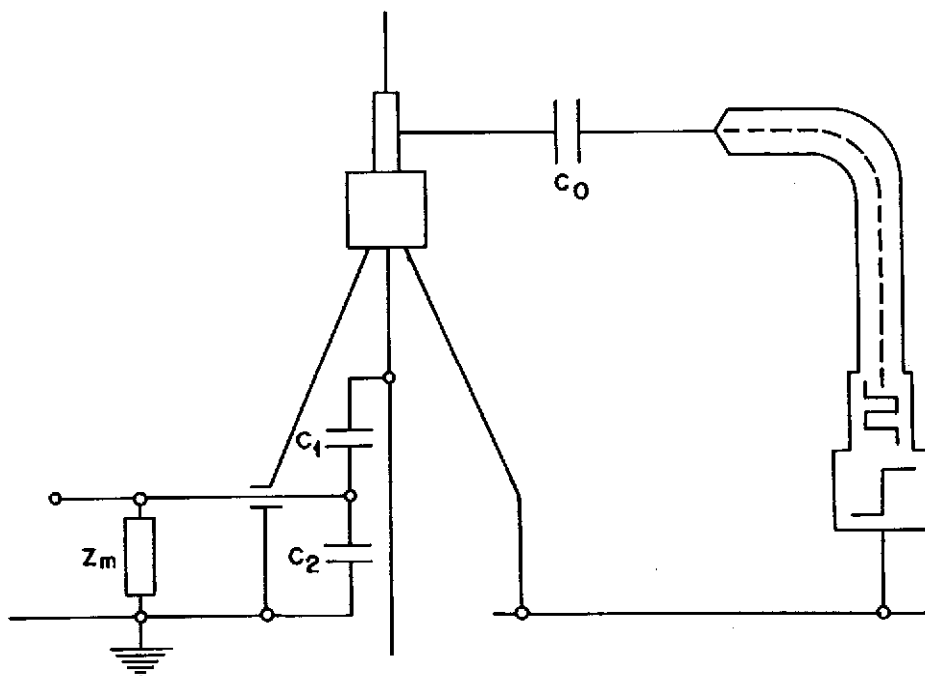


Figura 21-(a) - Circuito para a medição de descargas parciais através da derivação de ensaio da bucha

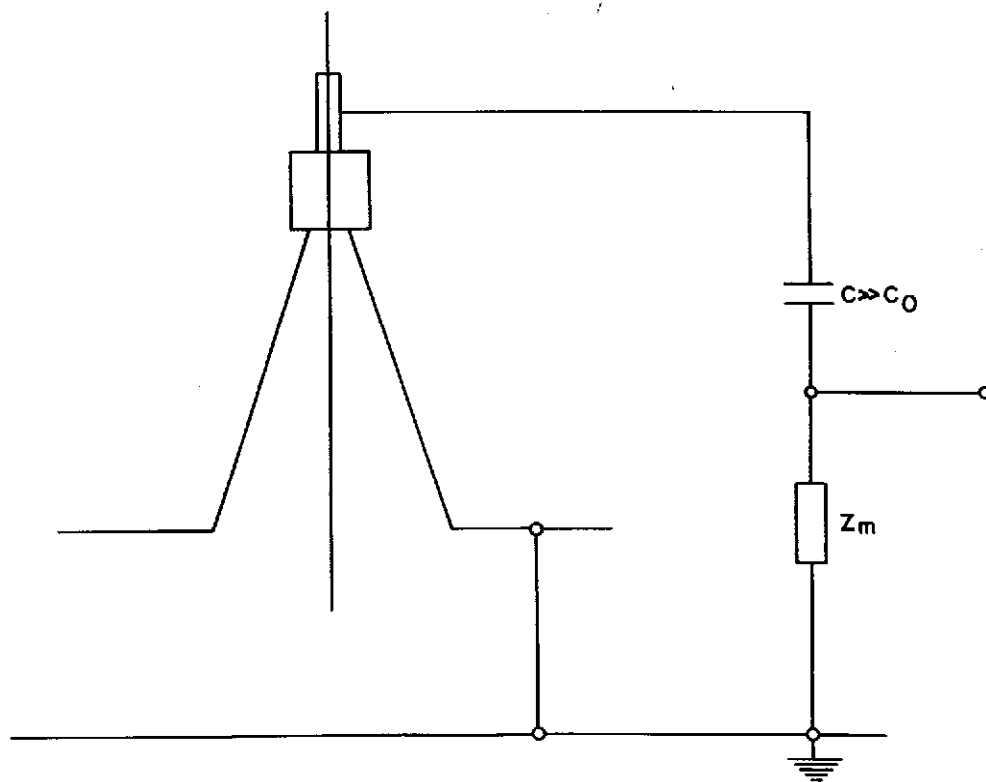


Figura 21-(b) - Circuito para a medição de descargas parciais através de capacitores de acoplamento

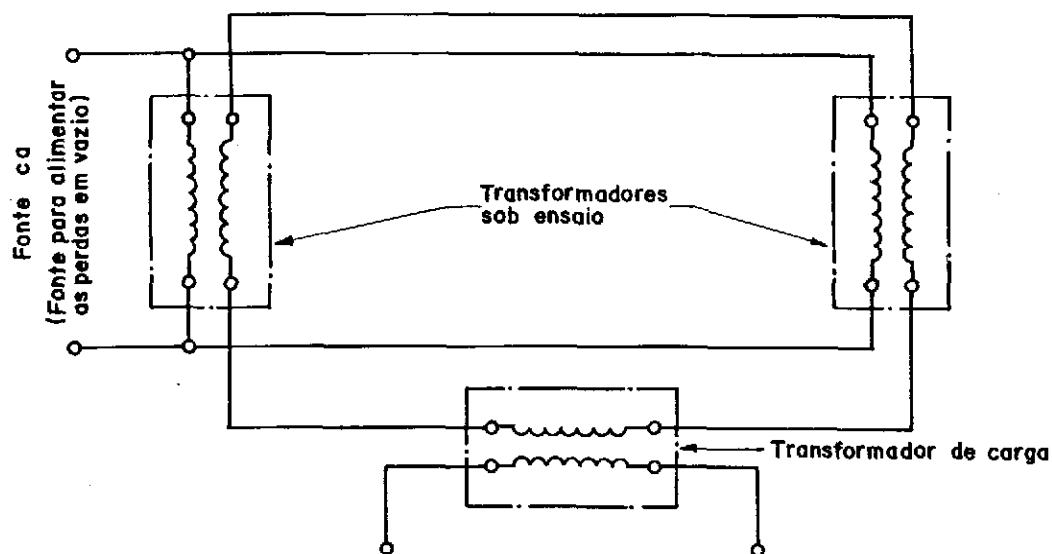


Figura 22 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores monofásicos, pelo método de oposição

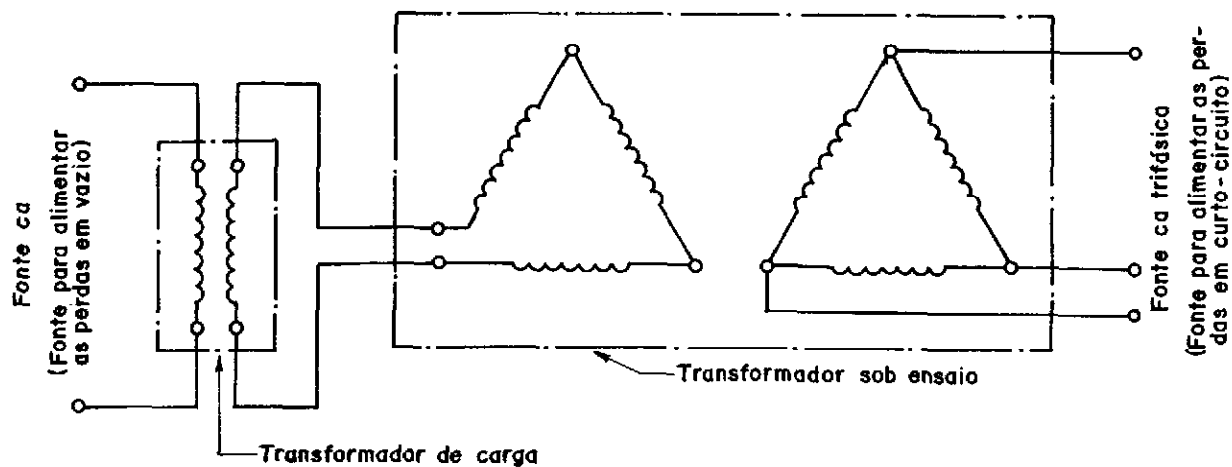


Figura 23 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em transformadores trifásicos ligados em triângulo-triângulo, pelo método de oposição

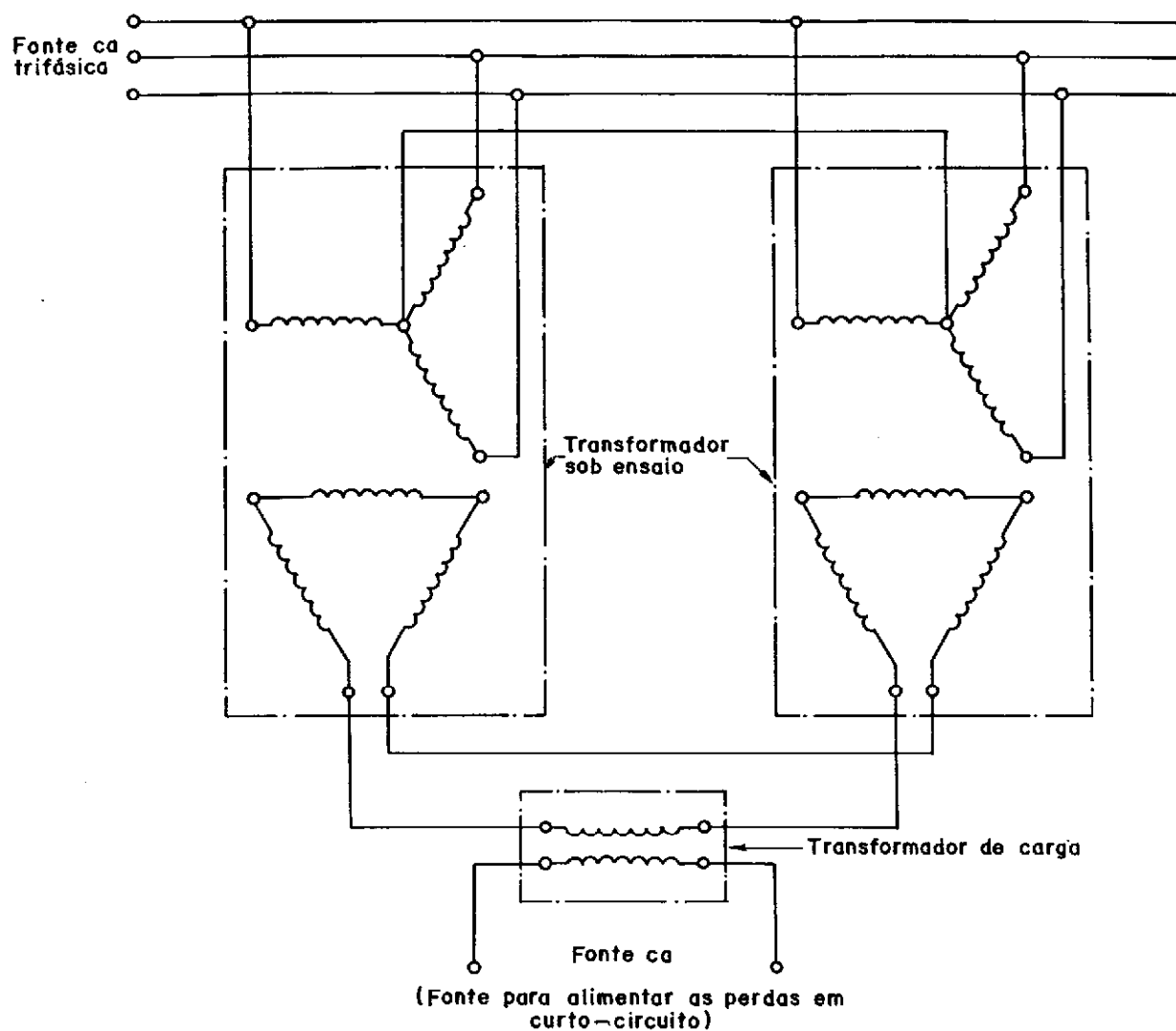


Figura 24 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-triângulo com neutro acessível, pelo método de oposição

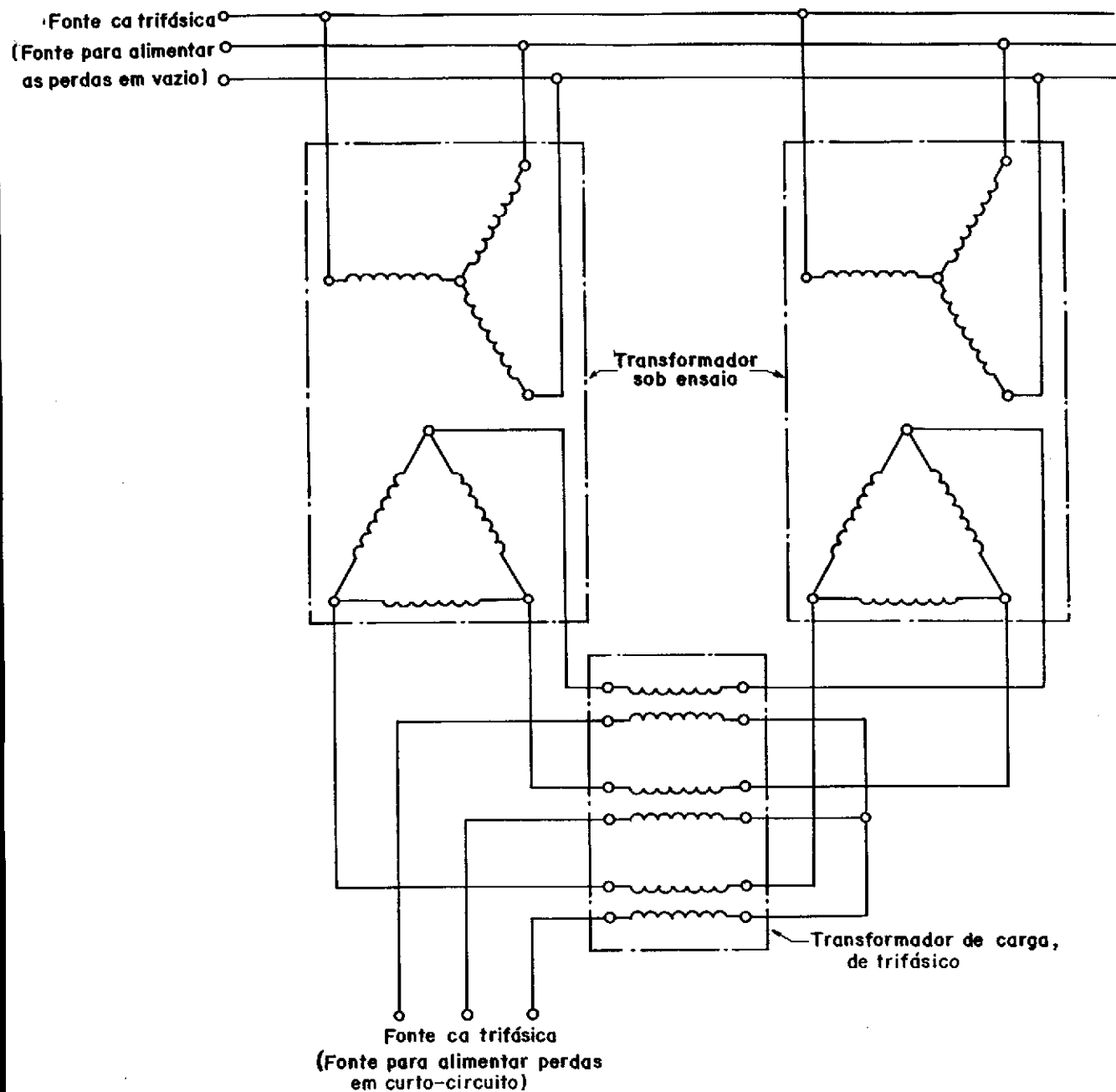


Figura 25 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-triângulo sem neutro acessível, pelo método de oposição

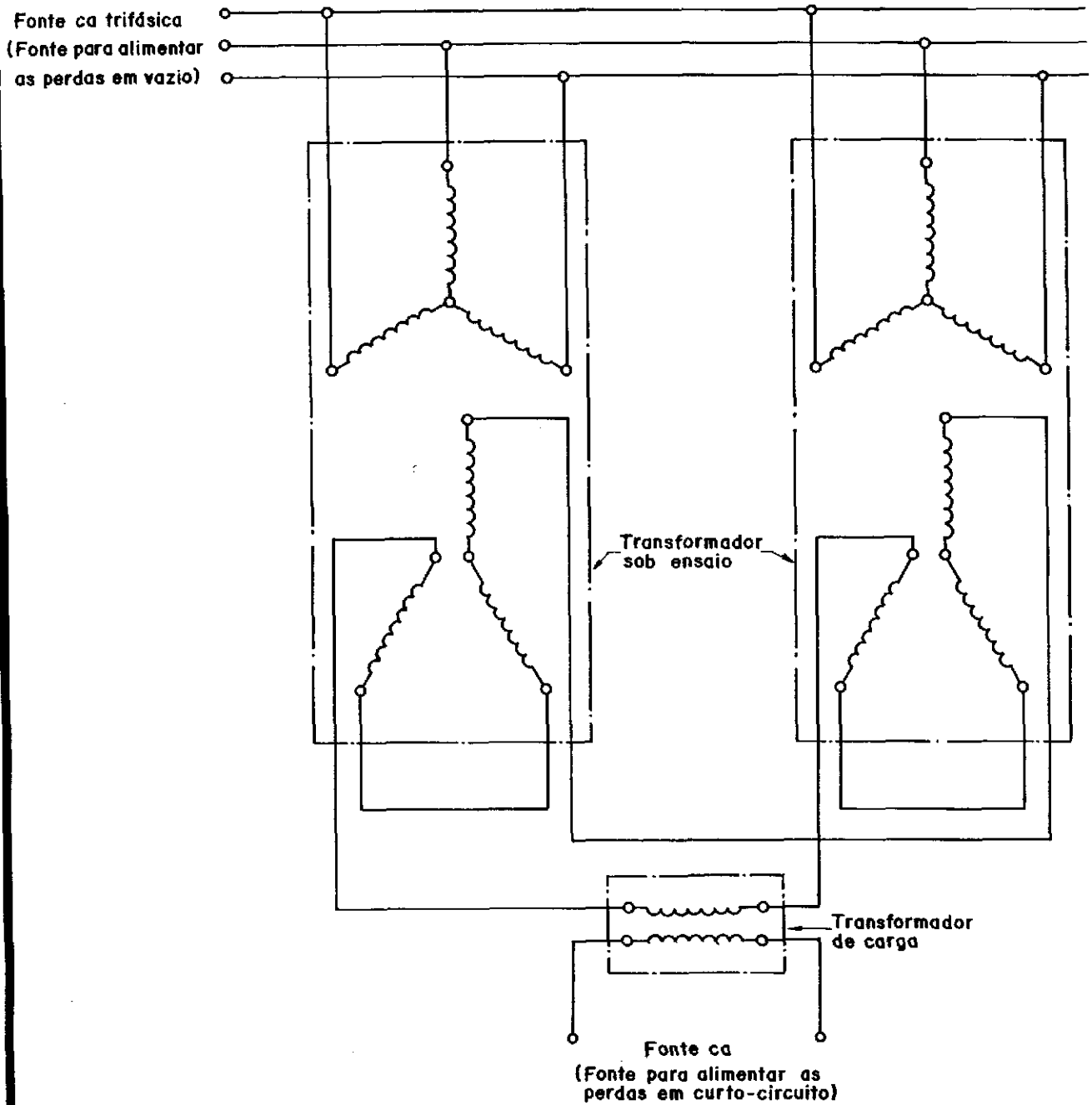


Figura 26 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-estrela com neutros acessíveis, pelo método de oposição

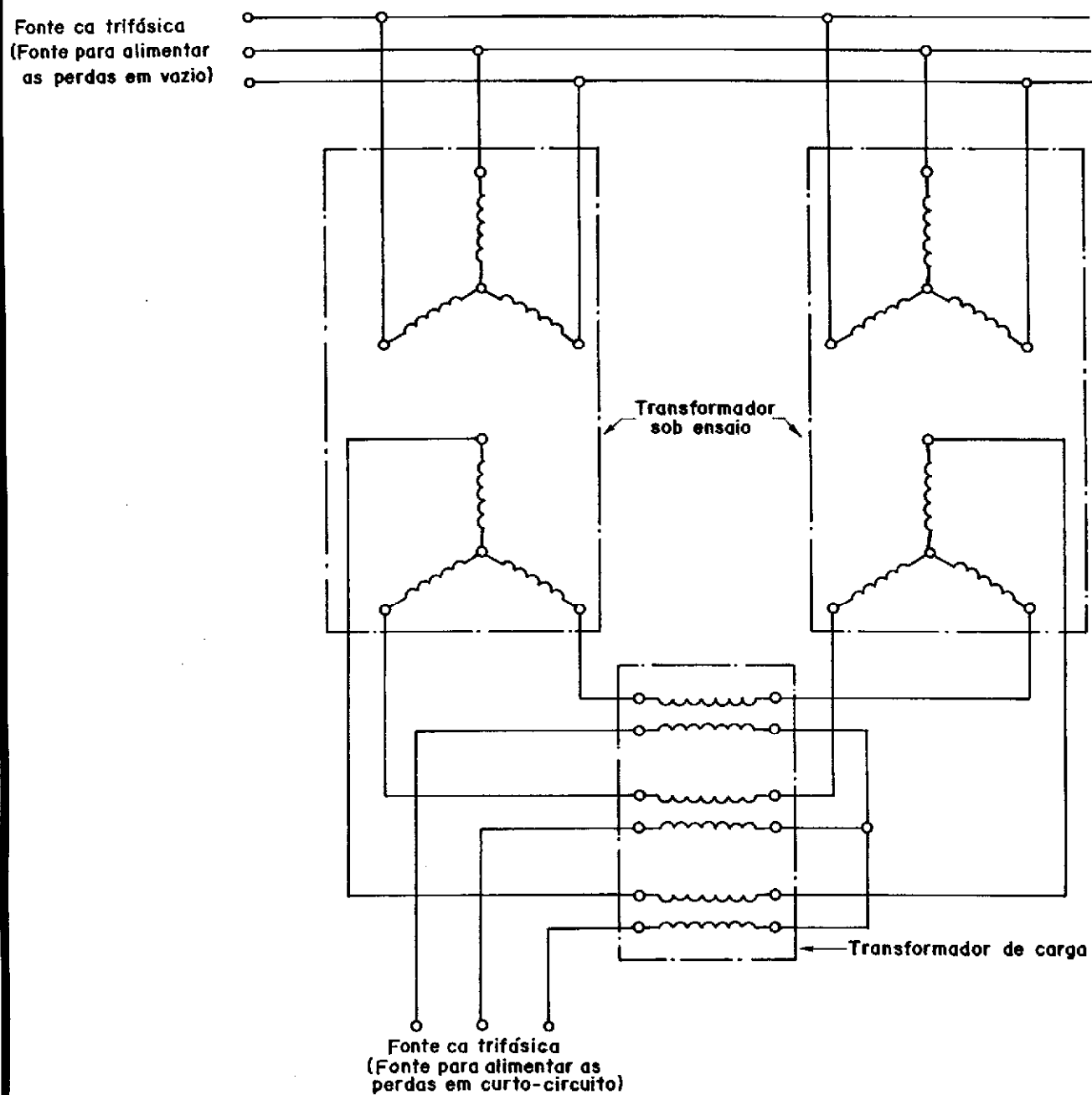


Figura 27 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-estrela sem neutro acessível, pelo método de oposição

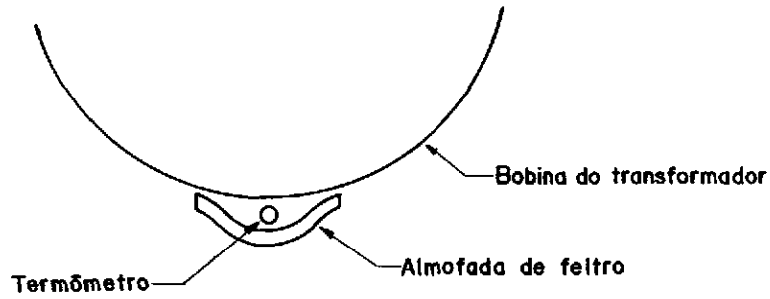


Figura 28 - Método para colocar termômetros em transformadores secos, utilizando-se almofada de feltro

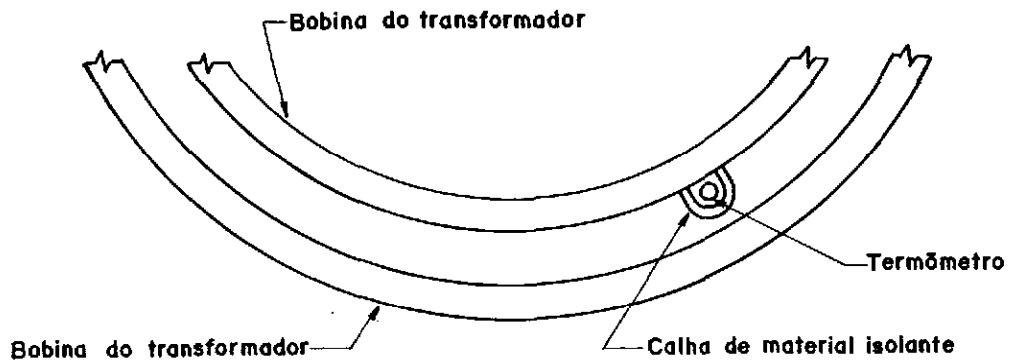
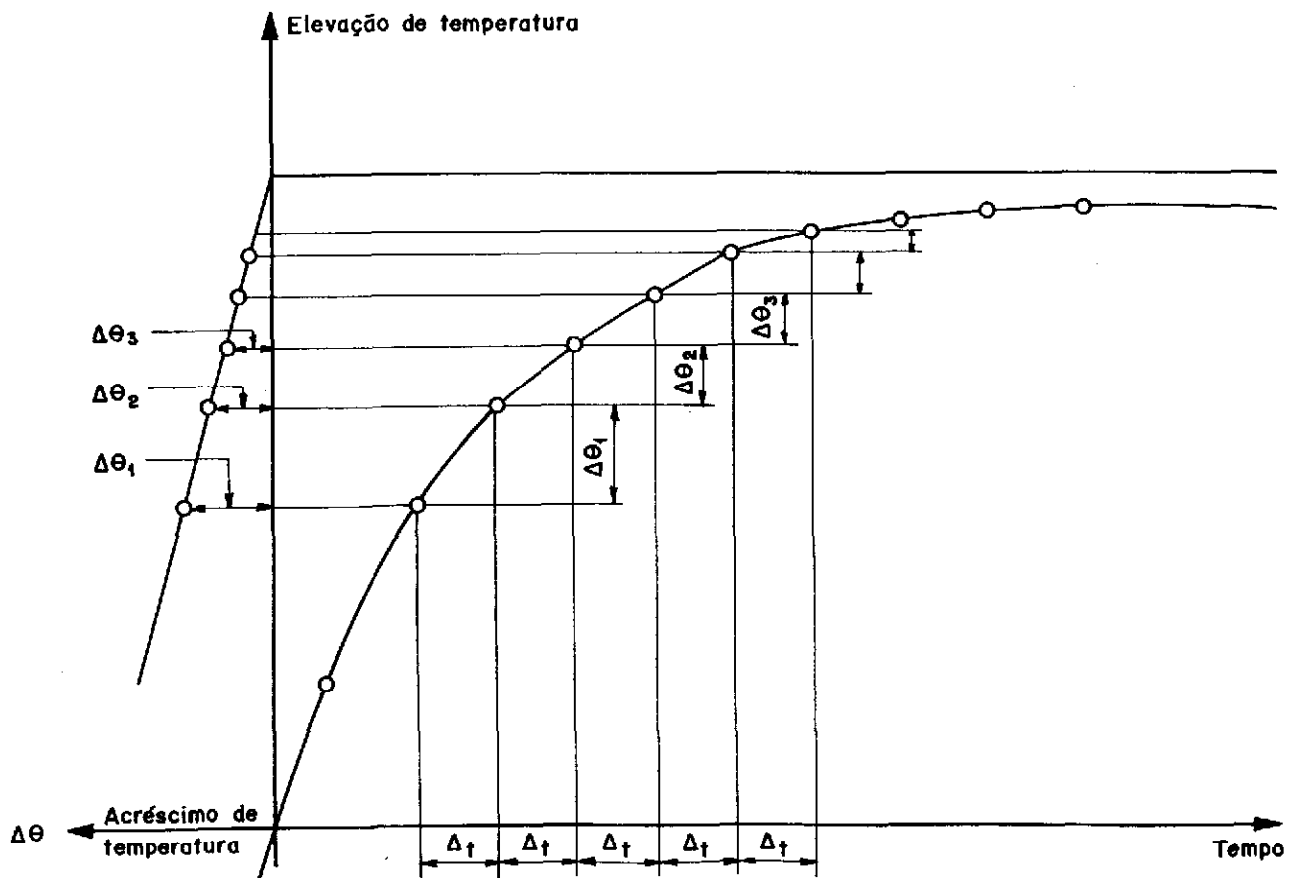


Figura 29 - Método para colocar termômetros em transformadores secos, utilizando-se calha de material isolante



As três escalas são lineares

Figura 30 - Método de determinação de temperatura final do óleo

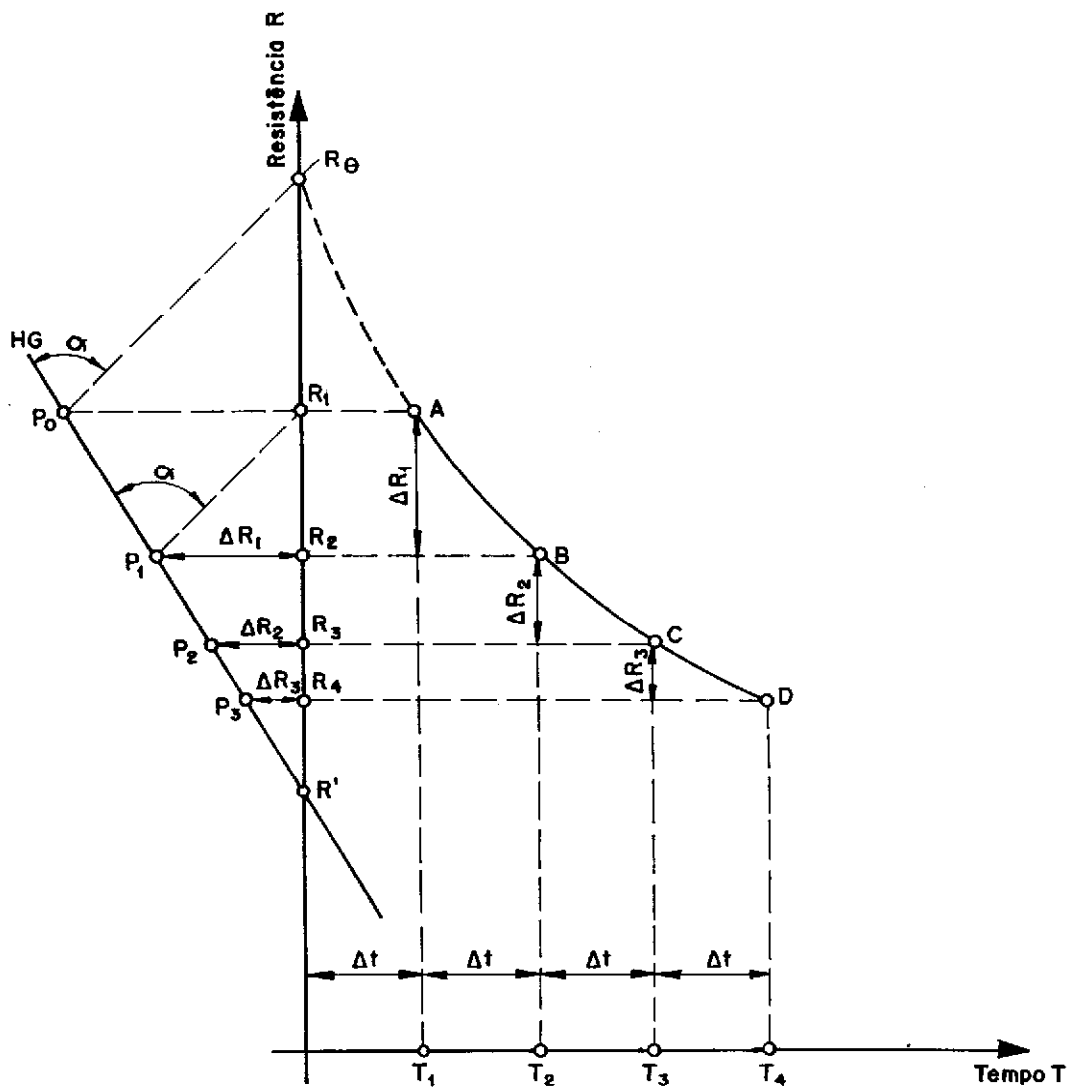


Figura 31 - Método gráfico para determinação da temperatura no instante do desligamento

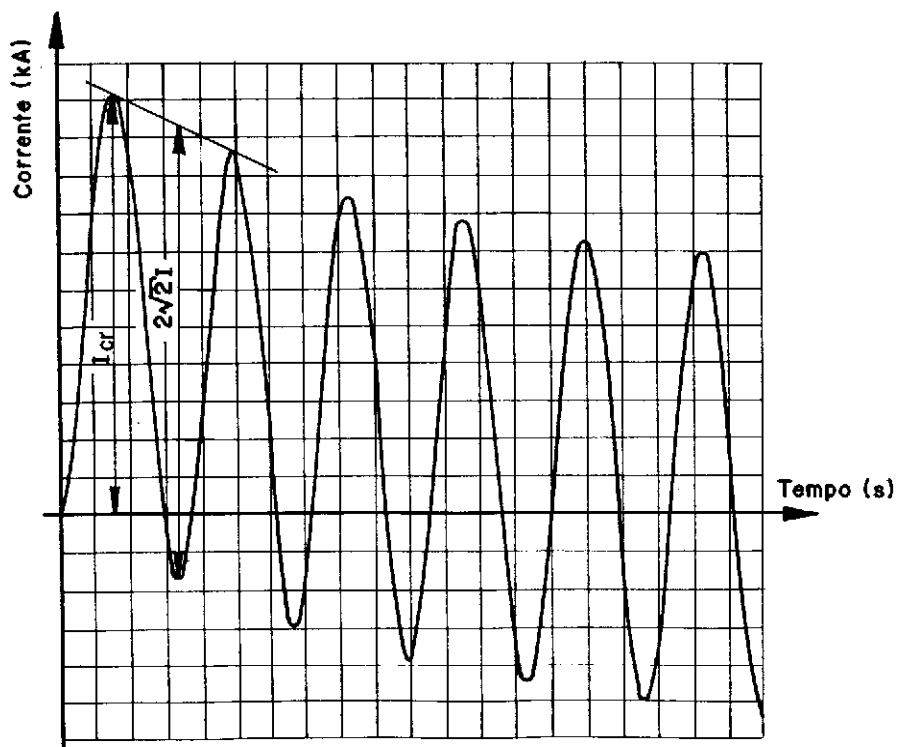
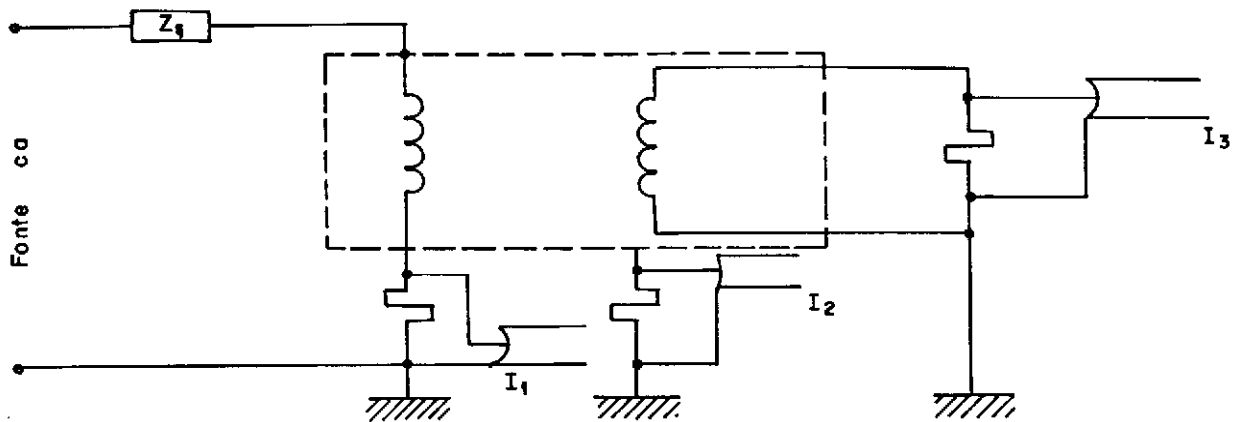


Figura 32 - Medição de I_2 e I_{cr} nos oscilogramas



I_1 - corrente no primário
 I_2 - corrente do tanque para terra
 I_3 - corrente no secundário

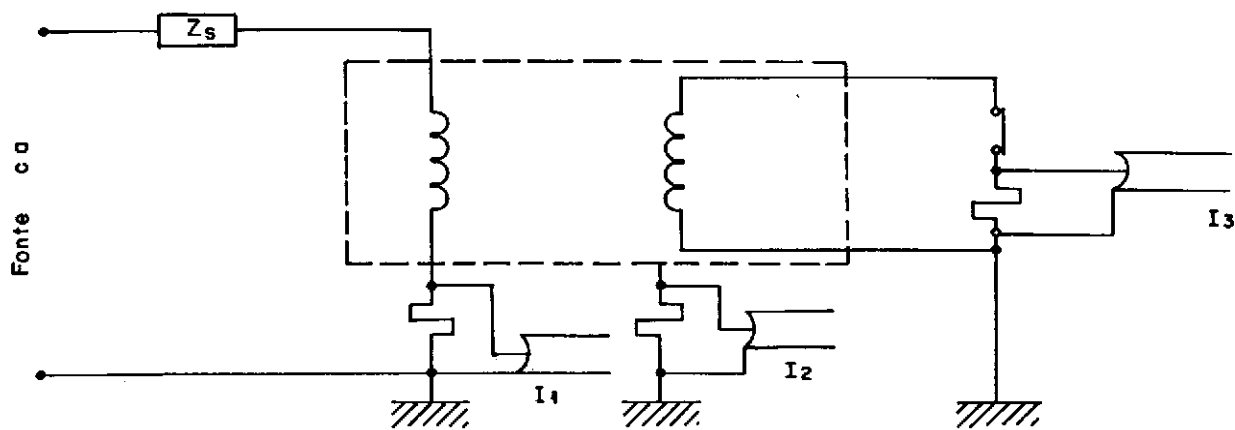
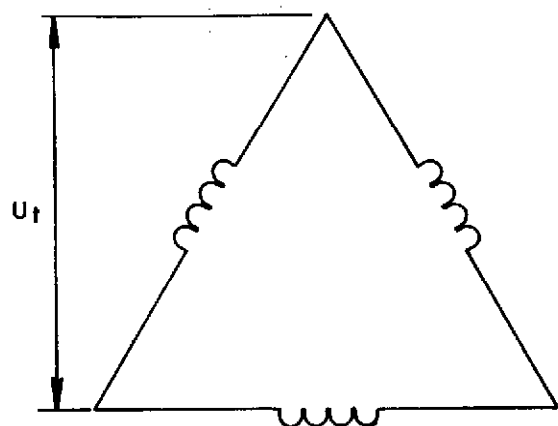
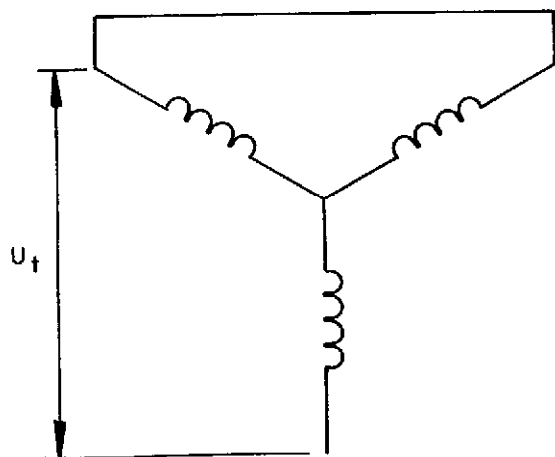
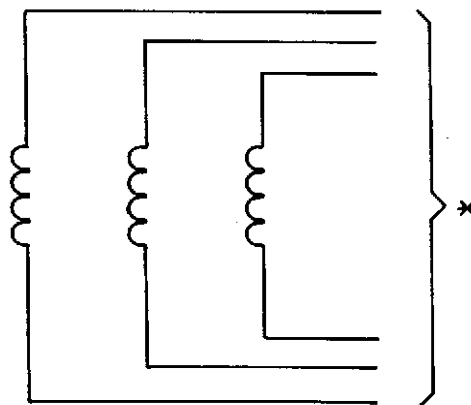


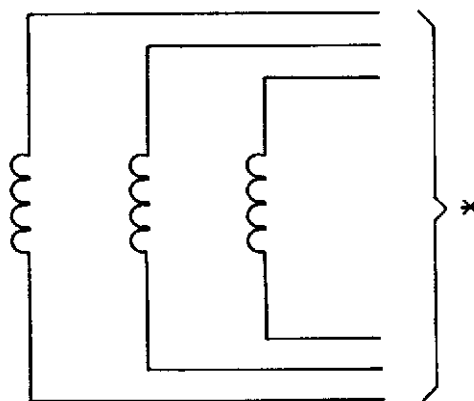
Figura 33 - Exemplo de ligações para ensaio de curto-circuito em transformadores de dois enrolamentos



$$U_t = U_{\phi\phi}$$



$$U_t = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\phi\phi}$$



* Ligação variável de acordo com o tipo de defeito especificado

Figura 34 - Exemplos de ligações do enrolamento a alimentar para execução de ensaios monofásicos em transformadores trifásicos de dois enrolamentos

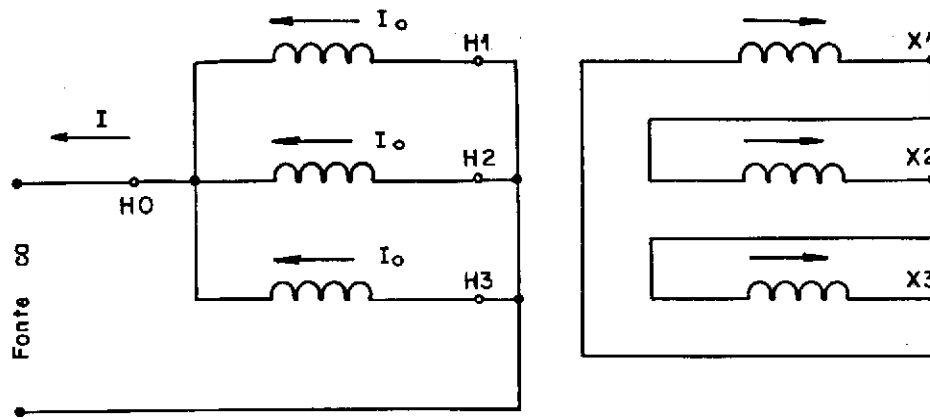


Figura 35-(a) - Transformadores com dois enrolamentos com neutro aterrado -
Ligação do circuito de ensaio em triângulo-estrela ou estrela-triângulo

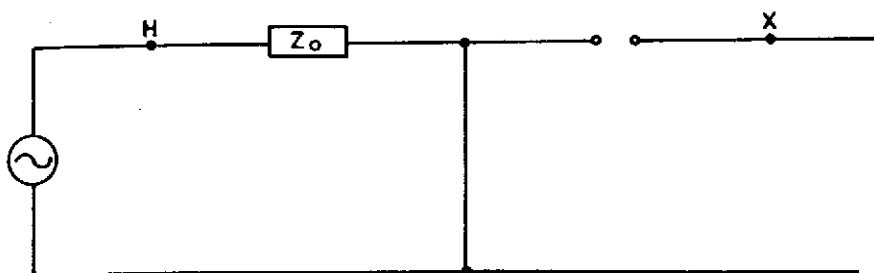


Figura 35-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 35-(a)

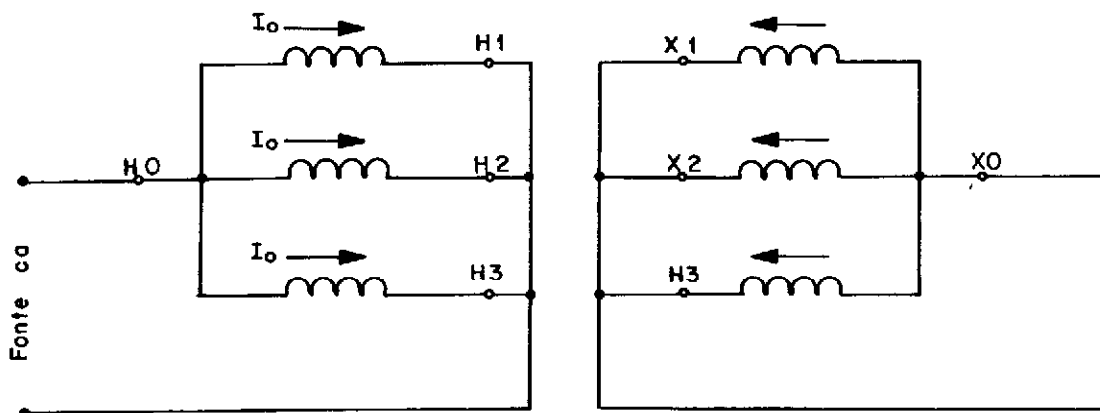


Figura 36-(a) - Transformadores com dois enrolamentos com neutros
aterrados - Ligação do circuito de ensaio em estrela-estrela

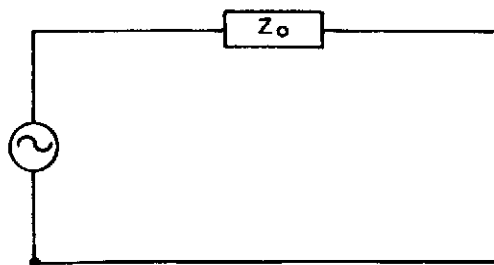


Figura 36-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 36-(a)

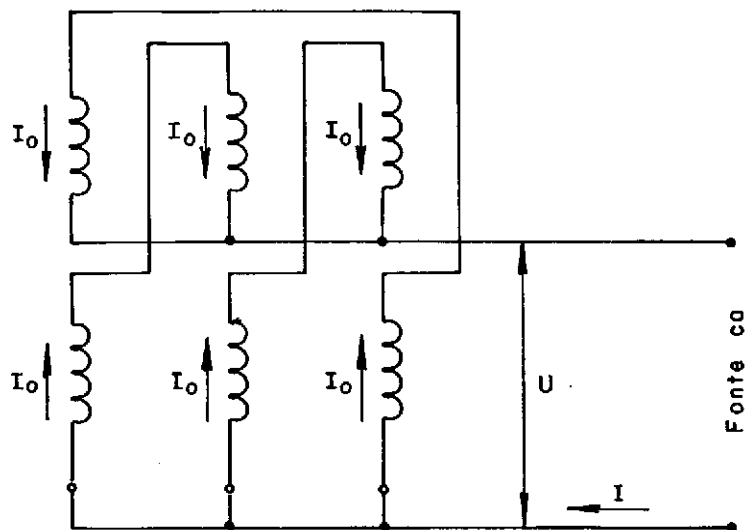


Figura 37-(a) - Transformador com dois enrolamentos - Ligação do circuito de ensaio em ziguezague

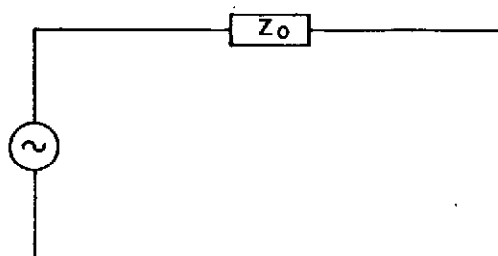


Figura 37-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 37-(a)

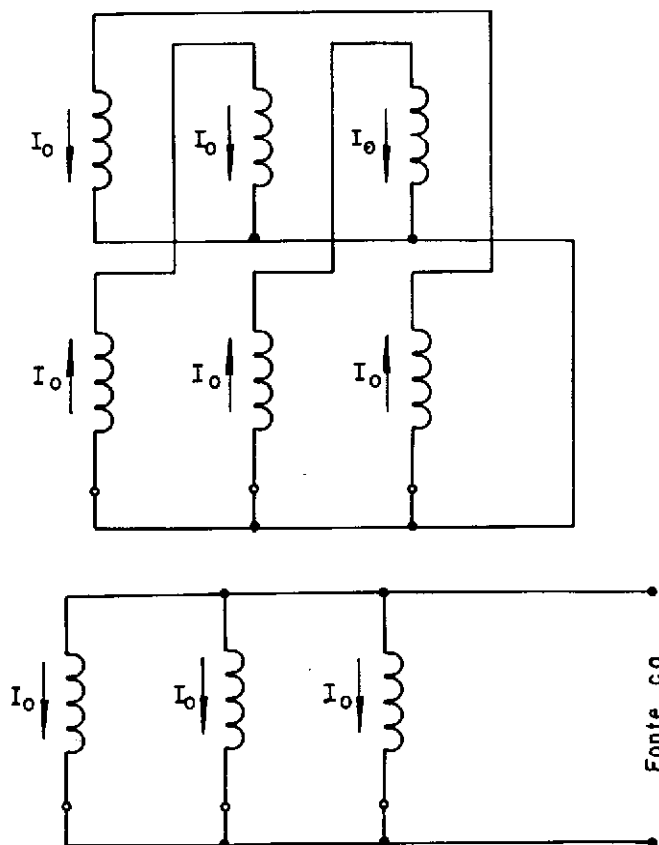


Figura 38-(a) - Transformadores com dois enrolamentos - Ligação do circuito de ensaio em estrela-ziguezague ou ziguezague-estrela

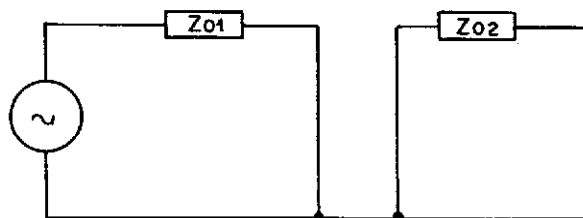


Figura 38-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 38-(a)

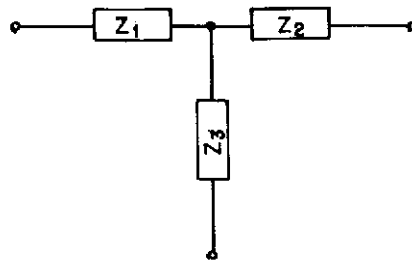


Figura 39 - Circuito equivalente para transformadores de três enrolamentos

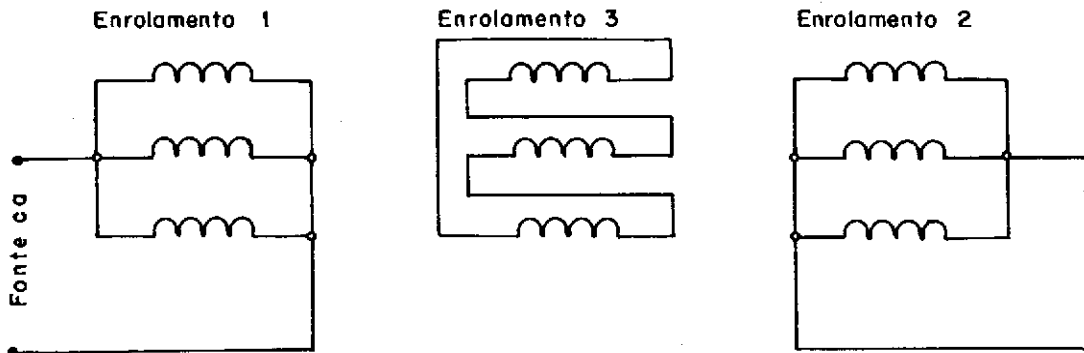


Figura 40-(a) - Ligação do circuito de ensaio para medição de Z_{12}

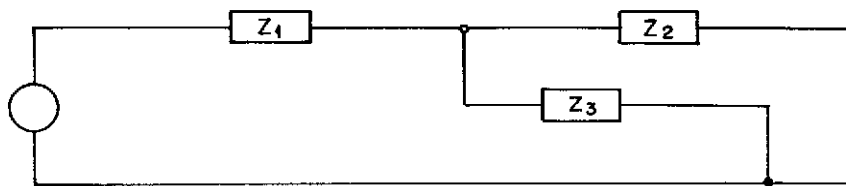


Figura 40-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 40-(a)

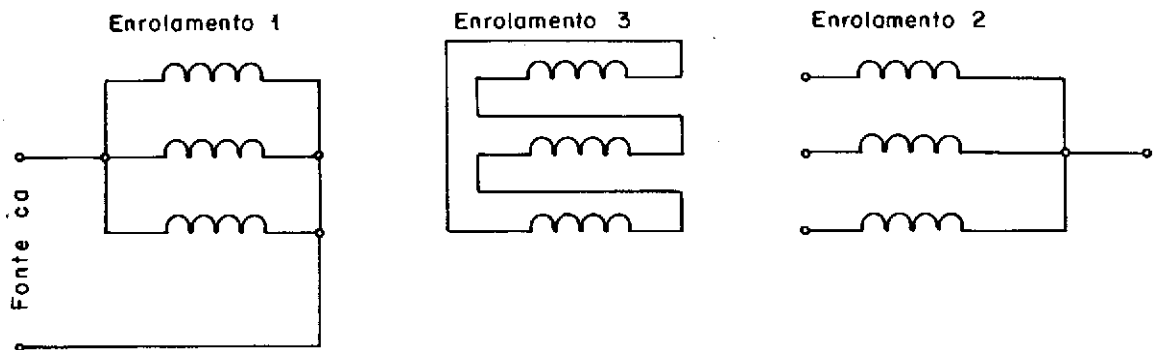


Figura 41-(a) - Ligação do circuito de ensaio para medição de Z_{13}

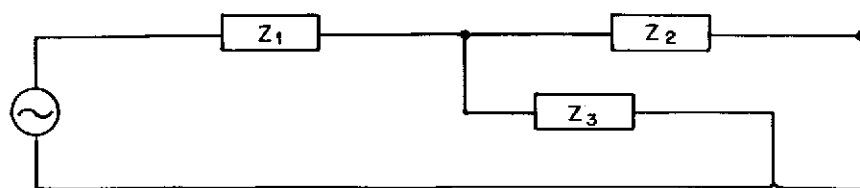


Figura 41-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 41-(a)

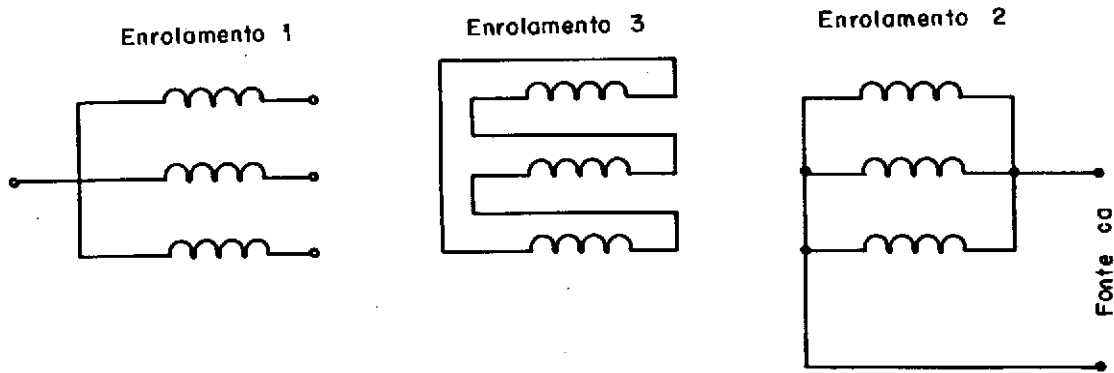


Figura 42-(a) - Ligação do circuito de ensaio para medição de Z_{23}

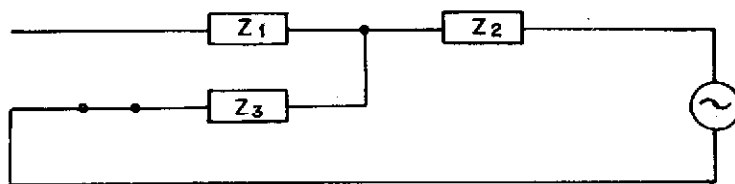


Figura 42-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 42-(a)

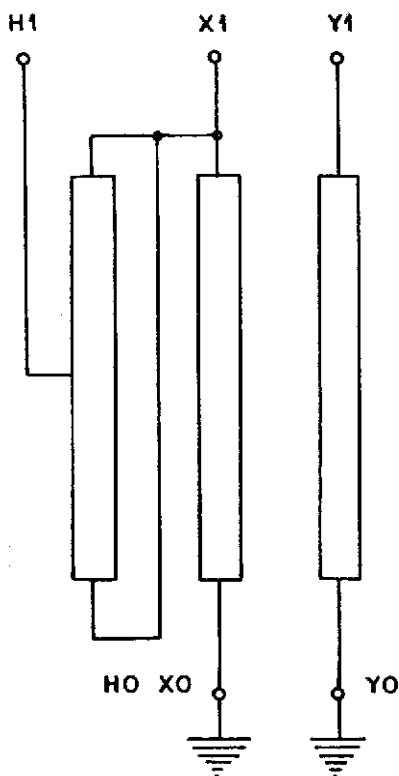


Figura 43 - Exemplo de localização de descargas parciais pelo método de medição multiterminal e comparação de perfis

Canal	Unidades arbitrárias			
	H1	X1	H0X0	Y1
Calibração				
H1 - Terra - 2000 pC	50	20	5	10
X1 - Terra - 2000 pC	5	50	30	8
H0X0 - Terra - 2000 pC	2	10	350	4
Y1 - Terra - 2000 pC	3	2	35	25
Ensaio				
U = 0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
U = Um	< 0,5	< 0,5	0,5	0,5
U = 1,5 Um	6	40	25	8

ANEXO B - Ensaio de descargas parciais - Critérios a serem seguidos na execução e procedimentos após um ensaio malsucedido

B-1 Na NBR 5356, são apresentados critérios de aceitação. O nível contínuo (estável) de descargas parciais, expresso como carga aparente medida entre os terminais de medição prescritos, não deve superar os limites especificados nem apresentar tendência significativa de elevação nas vizinhanças deste limite. Picos ocasionais de alta intensidade devem ser desprezados.

B-2 Caso não ocorram descargas disruptivas, mas tenham sido verificadas descargas parciais num nível acima do valor garantido (da ordem de milhares de pC), o ensaio deve ser então considerado não-destrutivo. O objeto em ensaio não deve ser imediatamente rejeitado devido a tal resultado, porém investigações mais profundas devem ser realizadas. Deve ser investigado principalmente o ambiente do ensaio para se detectar algum sinal evidente de fontes de descargas parciais. Isto deve ser seguido de consultas e acordo entre fabricante e comprador, com a finalidade de se estabelecerem ensaios mais profundos ou outros procedimentos que determinem ainda a presença de descargas parciais acima do valor garantido, ou que o transformador esteja satisfatório para entrada em funcionamento.

B-3 Seguem-se algumas sugestões que podem ser utilizadas durante os procedimentos acima descritos:

B-3.1 Investigar se as indicações estão verdadeiramente relacionadas à seqüência de ensaio ou são simplesmente coincidentes. Isto é normalmente facilitado através do acompanhamento oscilográfico do ensaio. Perturbações podem, por exemplo, ser identificadas pelo seu assincronismo com a tensão de ensaio.

B-3.2 Investigar se as descargas parciais podem ter sido transmitidas pela fonte de alimentação. Filtros passa-baixa nos cabos de alimentação para o transformador sob ensaio podem ser úteis nestes casos.

B-3.3 Investigar se as descargas parciais são provenientes de fontes dentro do transformador ou na parte externa dele (pontas provenientes de objetos submetidos à flutuação de potencial de entrada, de partes vivas no ar, ou de arestas vivas nas partes aterradas do transformador). Como o ensaio diz respeito ao isolamento interno, é permitida e recomendada a previsão de blindagens eletrostáticas na parte externa do transformador.

B-3.4 Investigar a provável localização da fonte (ou fontes) no que se refere ao diagrama elétrico do transformador. Existem diversos métodos conhecidos e publicados.

Um deles é baseado na correlação de leituras e calibrações em diferentes pares de terminais (em adição às leituras obrigatórias entre terminais de linha e terra). Este processo é descrito no Anexo E. É também possível a identificação de formas de pulsos individuais durante o ensaio com as correspondentes formas de onda obtidas na calibração, caso tenham sido utilizados registros provenientes do circuito de faixa larga. Um caso particular é a identificação de descargas parciais no dielétrico de buchas condensivas (ver Anexo E).

B-3.5 Investigar através de detector acústico ou ultrassônico a localização "geográfica" da fonte (ou fontes) interna(s) ao tanque.

B-3.6 Determinar a provável natureza física da fonte através de conclusões obtidas pela variação do nível da tensão de ensaio, efeito de histerese, forma do pulso ao longo da onda da tensão de ensaio, etc.

B-3.7 Descargas parciais no sistema de isolamento podem ser causadas por secagem ou impregnação do óleo insuficientes. Um processamento do transformador, ou um período maior de repouso, e uma subsequente repetição do ensaio podem ser tentados. É também bem conhecida que uma exposição limitada a uma descarga parcial relativamente elevada pode conduzir a uma descarga disruptiva localizada no óleo e temporariamente reduzir as tensões de extinção e reacendimento, mas as condições iniciais podem ser auto-restabelecidas em uma questão de horas.

B-3.8 Se as indicações de descargas parciais estiverem acima dos limites de aceitação, porém não sendo consideradas como de grande importância, pode ser feito um acordo para a repetição do ensaio, possivelmente com extensão do tempo da aplicação e, mesmo, com o nível da tensão de ensaio elevado. Variações relativamente limitadas do nível de descargas parciais com o acréscimo da tensão, e o não-aumento do nível de descargas parciais, com o tempo, podem ser aceitos como evidências de que o transformador está adequado para operação.

B-3.9 Traços de descargas parciais, visíveis após a abertura do transformador, não são usualmente encontrados, a menos que ele tenha sido exposto por um período de tempo considerável a níveis de descargas parciais muito altos em comparação com os limites de aceitação. Tal procedimento deve ser o último recurso se outros meios para melhorar o desempenho no transformador ou para identificar a fonte de descargas parciais tiverem falhado.

ANEXO C - Ensaio de elevação de temperatura - Determinação estatística da resistência ôhmica do enrolamento no instante do desligamento

C-1 O método para determinação da resistência ôhmica do enrolamento no instante do desligamento consiste na regressão linear de uma variável "x" pelo método dos mínimos quadrados, como a seguir:

$$y = ax + b$$

$$a = \frac{n \sum (x \cdot y) - \sum x \sum y}{n \sum (x^2) - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

$$r = a \cdot \sqrt{\frac{n \sum (x^2) - (\sum x)^2}{n \sum (y^2) - (\sum y)^2}}$$

Onde:

n = número de pares de leituras de resistência ôhmica e tempo

r = coeficiente de correlação entre as variáveis x e y. Quanto mais próximo de 1 for o valor de r, mais

perfeito é o ajustamento dos pontos x e y à reta $y = ax + b$

C-1.1 Os valores de y e x são relacionados com a resistência ôhmica R e o tempo t, respectivamente, como abaixo:

Valores	Regressão exponencial
y	$\log (R - R_m)$
x	t
R_0	$10^b + R_m$

Onde:

R_m = resistência ôhmica do enrolamento considerado, à temperatura média do óleo, no instante do desligamento

R_0 = resistência ôhmica no instante do desligamento.

C-2 Este método só é aceito para valores de r superiores ou iguais a 0,9.

ANEXO D - Circuitos usuais para ensaio de medição de impedância de seqüência zero

D-1 Transformadores com núcleo envolvente

Neste caso, a impedância de seqüência zero é igual à impedância de seqüência positiva, sendo, portanto, desnecessário efetuar a medição.

D-2 Transformadores com dois enrolamentos

D-2.1 Ligação triângulo-triângulo Dd

Transformadores com ambos os enrolamentos em triângulo apresentam impedância de seqüência zero infinita, não sendo necessário efetuar a medição.

D-2.2 Ligação triângulo-estrela ou estrela-triângulo, respectivamente Dy ou Yd

D-2.2.1 Neutro não aterrado

Neste caso, a impedância de seqüência zero é infinita, não sendo necessário efetuar a medição.

D-2.2.2 Neutro aterrado

Neste caso, apenas uma medição é necessária para estabelecer a impedância de seqüência zero. A ligação a ser utilizada neste ensaio está mostrada nas Figuras 35-(a) e 35-(b) do Anexo A. O valor de Z_{zero} é dado por:

$$Z_{\text{zero}} = 3 U/I$$

D-2.3 Ligação estrela-estrela Yy

D-2.3.1 Um neutro não aterrado

A impedância de seqüência zero, nestes casos, é infinita, não sendo necessário efetuar a medição.

D-2.3.2 Ambos os neutros aterrados

Neste caso, basta efetuar uma medição para estabelecer o valor da impedância de seqüência zero. A ligação, a ser utilizada no circuito de ensaio, está mostrada nas Figuras 36-(a) e 36-(b) do Anexo A. O valor de Z_{zero} é dado por:

$$Z_{\text{zero}} = 3 U/I$$

D-2.4 Transformadores com enrolamento ligado em zigzague

D-2.4.1 Transformador de aterramento

Apenas uma medição é necessária, sendo o circuito mostrado nas Figuras 37-(a) e 37-(b) do Anexo A. Deve ser dada atenção especial ao valor da corrente de ensaio e ao tempo de circulação da corrente. A impedância de seqüência zero é então dada por:

$$Z_{\text{zero}} = 3 U/I$$

D-2.4.2 Ligação estrela-ziguezague ou ziguezague-estrela

D-2.4.2.1 Em estrela com neutro não aterrado, basta efetuar apenas uma medição idêntica à descrita em D-2.4.1.

D-2.4.2.2 Em estrela com neutro aterrado, é necessário efetuar duas medições, conforme mostrado nas Figuras 37-(a), 37-(b), 38-(a) e 38-(b) do Anexo A. A primeira medição corresponde à medição da impedância do enrolamento ligado em ziguezague, sendo empregado o circuito das Figuras 37-(a) e 37-(b) do Anexo A. A segunda ligação corresponde à medição da impedância do enrolamento ligado em estrela. O circuito de ensaio a utilizar está mostrado nas Figuras 38-(a) e 38-(b) do Anexo A.

D-3 Transformadores com mais de dois enrolamentos

Transformadores com mais de dois enrolamentos apresentam mais de um caminho para a corrente de seqüência zero. Isso ocorre, por exemplo, se o transformador tiver dois enrolamentos com neutros aterrados. Nesses casos, é necessário efetuar duas ou mais medições conforme o número de impedâncias a estabelecer.

D-3.1 Ligação estrela-estrela-triângulo Yyd

D-3.1.1 Neste caso, o circuito equivalente é um circuito em T, cujos três ramos são as incógnitas, conforme mostrado nas Figuras 39, 40-(a), 40-(b), 41-(a), 41-(b), 42-(a) e 42-(b) do Anexo A. A medição de Z_{12} , Z_{13} e Z_{23} é efetuada como prescrito para transformadores de dois enrolamentos. Por exemplo, se enrolamento 1 = y, enrolamento 2 = y e enrolamento 3 = D, Z_{12} é medido como prescrito para a ligação estrela-estrela e Z_{13} , como prescrito para a ligação estrela-triângulo. No exemplo citado de transformadores ligados em estrela-estrela-triângulo, obtém-se em cada medição o especificado a seguir.

Com os valores de:

$$Z_{12} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3$$

obtêm-se os valores de:

$$Z_1 = Z_{13} - \sqrt{Z_{23} (Z_{13} - Z_{12})}$$

$$Z_2 = Z_{23} - \sqrt{Z_{23} (Z_{13} - Z_{12})}$$

$$Z_3 = Z_{23} (Z_{13} - Z_{12})$$

D-3.1.2 O princípio anteriormente exposto é aplicável para medição das impedâncias de seqüência zero em transformadores com qualquer combinação de ligações de enrolamentos.

D-4 Apresentação dos resultados

Como mostrado em D-3, em transformadores com mais de dois enrolamentos, é necessário separar o valor de impedâncias localizadas em enrolamentos com tensões diferentes. Para isso, embora os resultados sejam expressos por ohms por fase, é conveniente utilizar valores por unidade para os cálculos. A conversão entre valores absolutos por unidade é feita da seguinte forma:

$$Z \text{ (pu)} = \frac{Z}{Z_b}$$

Onde:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{P_b}$$

Sendo:

Z_b = impedância-base

V_b = tensão-base

P_b = potência-base

/ANEXO E

ANEXO E - Ensaio de descargas parciais - Localização de fontes de descargas parciais por meio de medições multiterminais e comparação de perfis

E-1 Uma fonte arbitrária de descargas parciais emite sinais a todos os pares terminais de medição acessíveis do transformador, e a forma destes sinais é a única fonte de referência. Se pulsos de calibração são injetados em pares terminais de calibração alternativos, estes pulsos também fornecem combinações características de sinais aos pares de medição. Se existir uma correlação evidente entre o perfil das leituras do ensaio em diferentes pares terminais de medição e o perfil obtido no mesmo terminal de medição para pulsos injetados em um determinado par de terminais de calibração, então pode-se supor que a fonte real de descargas esteja intimamente associada com este par de calibração. Isto significa que é possível chegar-se a uma conclusão, bem como localizar a fonte de descargas parciais através do diagrama elétrico do transformador. A "localização física" possui um conceito diferente - uma fonte de descargas parciais, que esteja localizada "eletricamente" nas vizinhanças de um determinado terminal, pode estar "fisicamente" localizada em qualquer lugar ao longo dos condutores terminais internos associados a este terminal ou no final da estrutura do enrolamento correspondente.

E-2 O procedimento utilizado para se obter a comparação de perfis é descrito a seguir:

- enquanto o gerador para calibração é ligado a um determinado par de terminais de calibração, são observadas as indicações em todos os pares terminais de medição. O procedimento é então repetido para outros pares de terminais de calibração. As calibrações são efetuadas entre os terminais do enrolamento e terra, mas podem também ser aplicadas entre terminais de linha

das buchas de AT e suas derivações capacitivas correspondentes (simulando descargas parciais do dielétrico da bucha), entre terminais de AT e neutro, e entre terminais dos enrolamentos de alta- e baixa-tensão. Todas as combinações de calibração e pares de medição formam uma "matriz de calibração" que fornece a referência de interpretação para as leituras no ensaio real.

E-3 O exemplo da Figura 43 do Anexo A mostra um autotransformador monofásico de extra-alta-tensão com um enrolamento terciário de baixa-tensão. As calibrações e ensaios foram efetuados tomando como referência os terminais conforme indicado na tabela da referida figura. A linha com os resultados do ensaio com 150% da tensão nominal é comparada com as diferentes calibrações, sendo, então, fácil notar, neste caso, que esta corresponde melhor à calibração "X1 - terra". Isto sugere que existem descargas parciais com carga aparente da ordem de 1500 pC, associadas ao terminal X1, e provavelmente das partes vivas para terra. A localização física pode estar em qualquer local ao longo dos condutores de ligação entre os enrolamentos-série e comum, ou no final de enrolamentos adjacentes. O método, como descrito, é bem-sucedido principalmente nos casos em que prevalece uma fonte distinta de descargas parciais, e o ruído de fundo é baixo. Isto, certamente, não é o caso mais comum.

E-4 Um caso particular de interesse é determinar se as descargas parciais observadas possam ter sua origem no dielétrico da bucha de AT. Isso pode ser investigado pela calibração entre o terminal de linha da bucha e sua derivação capacitiva. Esta calibração fornece a correlação mais próxima possível para o perfil das descargas parciais na bucha.

Índice

- 1 Objetivo
- 2 Documentos complementares
- 3 Definições
- 4 Execução dos ensaios
 - 4.1 Generalidades
 - 4.2 Resistência elétrica dos enrolamentos
 - 4.3 Relação de tensões
 - 4.3.1 Generalidades
 - 4.3.2 Método do voltímetro
 - 4.3.3 Método do transformador-padrão
 - 4.3.4 Método do transformador de referência de relação variável
 - 4.3.5 Método potenciométrico
 - 4.4 Resistência de isolamento
 - 4.5 Polaridade
 - 4.6 Deslocamento angular
 - 4.7 Seqüência de fases para transformadores polifásicos
 - 4.8 Perdas em vazio e corrente de excitação
 - 4.9 Perdas em carga e impedância de curto-circuito
 - 4.9.1 Transformadores monofásicos de dois enrolamentos
 - 4.9.2 Transformadores trifásicos de dois enrolamentos
 - 4.9.3 Autotransformadores monofásicos e trifásicos
 - 4.9.4 Transformadores de três enrolamentos e auto-transformadores com terciário
 - 4.9.5 Transformador com mais de três enrolamentos
 - 4.9.6 Ensaios com corrente reduzida
 - 4.10 Ensaios dielétricos
 - 4.10.1 Tensão suportável nominal à frequência industrial (tensão aplicada)
 - 4.10.2 Tensão induzida - Disposições gerais
 - 4.10.3 Tensão induzida para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 242 kV - Disposições gerais
 - 4.10.4 Tensão induzida para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 242 kV - Isolamento uniforme
 - 4.10.5 Tensão induzida para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 242 kV - Isolamento progressivo
 - 4.10.6 Tensão induzida com medição de descargas parciais para transformadores com tensão máxima do equipamento igual ou superior a 362 kV
 - 4.10.7 Descargas parciais - Disposições gerais
 - 4.10.8 Descargas parciais - Medição e calibração em picocoulombs (pC)
 - 4.10.9 Descargas parciais - Medição e calibração em microvolts (μ V)
 - 4.10.10 Descargas parciais - Procedimento após um ensaio malsucedido
 - 4.10.11 Tensão suportável nominal de impulso atmosférico
 - 4.10.12 Impulso de manobra
 - 4.11 Estanqueidade e resistência à pressão interna e estanqueidade a quente
 - 4.11.1 Ensaio à temperatura ambiente
 - 4.11.2 Ensaio a quente
 - 4.12 Fator de potência do isolamento
 - Tabela 1 - Ligações para ensaios de fator de potência do isolamento
 - Tabela 2 - Fatores de correção
 - 4.13 Elevação de temperatura
 - 4.13.1 Ensaio de transformadores imersos em óleo
 - 4.13.2 Elevação de temperatura do topo do óleo
 - 4.13.3 Temperatura média do óleo
 - 4.13.4 Elevação de temperatura média do óleo
 - 4.13.5 Elevação de temperatura dos enrolamentos
 - 4.13.6 Métodos de carga
 - 4.13.7 Ensaios de transformadores secos
 - 4.13.8 Procedimento para ensaio de elevação de temperatura
 - 4.14 Ensaio de curto-circuito
 - 4.14.1 Considerações gerais
 - 4.14.2 Condições do transformador antes dos ensaios de curto-circuito
 - 4.14.3 Valor e duração da aplicação da corrente de ensaio de curto-circuito para transformadores de dois enrolamentos
 - 4.14.4 Verificação dos valores de crista e simétrico da corrente de ensaio
 - 4.14.5 Procedimento para ensaio de curto-circuito em transformadores de dois enrolamentos
 - 4.14.6 Número de aplicações
 - 4.14.7 Detecção de defeitos e avaliação dos resultados do ensaio de curto-circuito
 - 4.15 Medição da impedância de seqüência zero
 - 4.16 Acessórios
 - 4.16.1 Indicador externo de nível de óleo
 - 4.16.2 Indicador de temperatura do óleo
 - 4.16.3 Relé detector de gás tipo Buchholz ou equivalente - Verificação da atuação dos contatos
 - 4.16.4 Indicador de temperatura do enrolamento
 - 4.16.5 Comutador sem tensão
 - 4.16.6 Ventilador
 - 4.16.7 Bomba de óleo
 - 4.16.8 Indicador de circulação de óleo
 - 4.16.9 Dispositivo para alívio de pressão
 - 4.16.10 Comutadores de derivações em carga
 - 4.17 Medição do nível de ruído
 - 4.18 Medição de harmônicos na corrente de excitação
 - 4.19 Medição da potência absorvida pelos motores de bombas de óleo e ventiladores

- 4.20 Medição dos gases dissolvidos no óleo isolante
- 4.21 Medição de nível de tensão de radiointerferência
- 4.22 Ensaios de verificação das pinturas externa e interna de transformadores
 - 4.22.1 Espessura
 - 4.22.2 Aderência
 - 4.22.3 Outros ensaios
 - 4.22.4 Umidade
 - 4.22.5 Impermeabilidade
 - 4.22.6 Brisa marítima
- 4.23 Regulação e rendimento
 - 4.23.1 Regulação
 - 4.23.2 Rendimento

ANEXO A - Figuras

- Figura 1 - Diagrama de ligações para determinação da relação de tensões pelo método do transformador-padrão, com voltímetro ligado para medir a diferença entre as duas tensões secundárias
- Figura 2 - Diagrama de ligações para determinação da relação de tensões pelo método do transformador-padrão, com voltímetros ligados para medir as duas tensões secundárias
- Figura 3 - Diagrama de ligações para determinação da relação de tensões pelo método potenciométrico
- Figura 4 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade por comparação com um transformador-padrão
- Figura 5 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade por golpe indutivo, com corrente contínua (polaridade subtrativa)
- Figura 6 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade por golpe indutivo, com corrente contínua (polaridade aditiva)
- Figura 7 - Diagrama de ligações para determinação da polaridade pelo emprego de corrente alternada
- Figura 8 - Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais de tensão, para ligações de transformadores trifásicos
- Figura 9 - Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais de tensão, para ligações de transformadores hexafásicos
- Figura 10 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores monofásicos, sem transformadores para instrumentos
- Figura 11 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores monofásicos, com transformadores para instrumentos
- Figura 12 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores trifásicos, pelo método de dois wattímetros
- Figura 13 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores trifásicos, de neutro acessível, pelo método de três wattímetros
- Figura 14 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores trifásicos, pelo método de três wattímetros, usando um neutro de wattímetro artificial
- Figura 15 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e correntes de excitação de transformadores trifásicos, pelo método de três wattímetros, usando um neutro artificial para os wattímetros com transformadores para instrumentos
- Figura 16 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de transformadores monofásicos de dois enrolamentos
- Figura 17 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de transformadores trifásicos
- Figura 18 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de autotransformadores monofásicos
- Figura 19 - Diagrama de ligações para ensaio de perdas em curto-circuito e tensão de curto-circuito de autotransformadores trifásicos
- Figura 20 - Ligações para ensaio monofásico de tensão induzida em transformadores com enrolamento progressivo
- Figura 21-(a) - Circuito para a medição de descargas parciais através da derivação de ensaio da bucha
- Figura 21-(b) - Circuito para a medição de descargas parciais através de capacitores de acoplamento
- Figura 22 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores monofásicos, pelo método de oposição
- Figura 23 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em transformadores trifásicos ligados em triângulo-triângulo, pelo método de oposição
- Figura 24 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-triângulo com neutro acessível, pelo método de oposição

- Figura 25 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-triângulo sem neutro acessível, pelo método de oposição
- Figura 26 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-estrela com neutros acessíveis, pelo método de oposição
- Figura 27 - Diagrama de ligações para ensaio de elevação de temperatura em dois transformadores trifásicos, ligados em estrela-estrela sem neutro acessível, pelo método de oposição
- Figura 28 - Método para colocar termômetros em transformadores secos, utilizando-se almofada de feltro
- Figura 29 - Método para colocar termômetros em transformadores secos, utilizando-se calha de material isolante
- Figura 30 - Método de determinação de temperatura final do óleo
- Figura 31 - Método gráfico para determinação da temperatura no instante do desligamento
- Figura 32 - Medição de I_2 e I_{cr} nos oscilogramas
- Figura 33 - Exemplo de ligações para ensaio de curto-circuito em transformadores de dois enrolamentos
- Figura 34 - Exemplos de ligações do enrolamento a alimentar para execução de ensaios monofásicos em transformadores trifásicos de dois enrolamentos
- Figura 35-(a) - Transformadores com dois enrolamentos com neutro aterrado - Ligação do circuito de ensaio em triângulo-estrela ou estrela-triângulo
- Figura 35-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 35-(a)
- Figura 36-(a) - Transformadores com dois enrolamentos com neutros aterrados - Ligação do circuito de ensaio em estrela-estrela
- Figura 36-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 36-(a)
- Figura 37-(a) - Transformador com dois enrolamentos - Ligação do circuito de ensaio em zig-zague
- Figura 37-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 37-(a)
- Figura 38-(a) - Transformadores com dois enrolamentos - Ligação do circuito de ensaio em estrela-ziguezague ou ziguezague-estrela
- Figura 38-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 38-(a)
- Figura 39 - Circuito equivalente para transformadores de três enrolamentos
- Figura 40-(a) - Ligação do circuito de ensaio para medição de Z_{12}
- Figura 40-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 40-(a)
- Figura 41-(a) - Ligação do circuito de ensaio para medição de Z_{13}
- Figura 41-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 41-(a)
- Figura 42-(a) - Ligação do circuito de ensaio para medição de Z_{23}
- Figura 42-(b) - Circuito equivalente ao da Figura 42-(a)
- Figura 43 - Exemplo de localização de descargas parciais pelo método de medição multiterminal e comparação de perfis
- ANEXO B - Ensaio de descargas parciais - Critérios a serem seguidos na execução e procedimentos após um ensaio malsucedido
- ANEXO C - Ensaio de elevação de temperatura - Determinação estatística da resistência ôhmica do enrolamento no instante do desligamento
- ANEXO D - Circuitos usuais para ensaio de medição de impedância de seqüência zero
- ANEXO E - Ensaio de descargas parciais - Localização de fontes de descargas parciais por meio de medições multiterminais e comparação de perfis