

Primeira edição  
17.12.2007

Válida a partir de  
17.01.2008

Versão corrigida  
02.07.2010

---

## Transformadores de potência Parte 1: Generalidades

*Power transformers  
Part 1: General*

Palavras-chave: Transformador. Generalidade.  
*Descriptors: Transformer. General.*

ICS 29.180

ISBN 978-85-07-00873-6



ASSOCIAÇÃO  
BRASILEIRA  
DE NORMAS  
TÉCNICAS

Número de referência  
ABNT NBR 5356-1:2007  
95 páginas

©ABNT 2007



© ABNT 2007

Todos os direitos reservados. A menos que especificado de outro modo, nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida ou por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e microfilme, sem permissão por escrito pela ABNT.

Sede da ABNT  
Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar  
20031-901 - Rio de Janeiro - RJ  
Tel.: + 55 21 3974-2300  
Fax: + 55 21 2220-1762  
abnt@abnt.org.br  
www.abnt.org.br

Impresso no Brasil

## Sumário

Página

Prefácio.....	vii
1 Escopo.....	1
2 Referências normativas .....	1
3 Termos e definições .....	3
4 Condições de funcionamento .....	12
4.1 Condições normais de funcionamento .....	12
4.2 Disposições para condições especiais de funcionamento.....	13
5 Regime nominal .....	13
5.1 Potência nominal.....	13
5.2 Condições de carregamento .....	14
5.3 Valores preferenciais de potência nominal .....	14
5.4 Funcionamento à tensão superior à tensão nominal e/ou com variação de frequência .....	14
6 Requisitos para transformadores que possuam um enrolamento com derivação .....	15
6.1 Generalidades – Notação para faixa de derivação.....	15
6.2 Tensão de derivação – Corrente de derivação - Categorias normalizadas de variação de tensão de derivação – Derivação de tensão máxima .....	16
6.3 Potência de derivação – Derivações a plena potência – Derivações de potência reduzida.....	18
6.4 Especificação de derivações na especificação técnica e pedido de compra .....	18
6.5 Especificação da impedância de curto-circuito .....	19
6.6 Perdas em carga e elevação de temperatura .....	19
7 Marcações dos terminais e símbolos de ligação e deslocamento angular para transformadores trifásicos .....	20
7.1 Marcação dos enrolamentos e terminais .....	20
7.1.1 Enrolamentos .....	20
7.1.2 Terminais .....	20
7.1.3 Localização dos terminais H .....	23
7.1.4 Terminal de neutro .....	23
7.1.5 Localização dos terminais em transformadores monofásicos .....	23
7.1.6 Localização dos terminais X .....	23
7.1.7 Localização dos terminais Y e Z .....	23
7.2 Ligação dos enrolamentos de fase e indicação do deslocamento angular .....	23
8 Placas de identificação .....	29
8.1 Informações a serem fornecidas em todos os casos .....	29
8.2 Informações suplementares a serem fornecidas quando aplicável .....	31
9 Requisitos gerais.....	31
9.1 Dimensionamento da conexão de neutro .....	31
9.2 Sistema de preservação de óleo .....	32
9.3 Rejeição de carga em transformadores elevadores .....	32
9.4 Características construtivas .....	32
9.4.1 Características do líquido isolante .....	32
9.4.2 Tanque do transformador e respectiva tampa .....	32
9.4.3 Radiadores .....	33
9.4.4 Acabamento do tanque e dos radiadores .....	33
9.4.5 Juntas de vedação.....	33
9.4.6 Aterramento do núcleo .....	33
9.4.7 Suportabilidade a vácuo .....	33
9.4.8 Comutador de derivações em carga.....	33
9.5 Acessórios .....	34
9.5.1 Indicador externo de nível de óleo .....	35

9.5.2	Indicador de temperatura do enrolamento .....	35
9.5.3	Indicador de temperatura do óleo.....	35
9.5.4	Provisão para instalação de termômetro para óleo.....	35
9.5.5	Dispositivo para alívio de pressão .....	35
9.5.6	Relé detector de gás tipo Buchholz ou equivalente .....	35
9.5.7	Caixa com blocos de terminais para ligação dos cabos de controle .....	35
9.5.8	Válvula de drenagem de óleo .....	35
9.5.9	Meios de ligação para filtro .....	37
9.5.10	Dispositivo para retirada de amostra de óleo .....	37
9.5.11	Conservador do óleo (em transformadores não selados) .....	37
9.5.12	Válvulas para retenção do óleo dos radiadores ou trocador de calor.....	37
9.5.13	Meios de aterramento do tanque .....	37
9.5.14	Meios para suspensão do transformador completamente montado da parte ativa, das tampas, do conservador de óleo e dos radiadores.....	37
9.5.15	Meios para locomoção .....	37
9.5.16	Apoios para macacos.....	38
9.5.17	Abertura de visita .....	38
9.5.18	Abertura de inspeção .....	38
9.5.19	Comutador de derivações sem tensão.....	38
10	Tolerâncias .....	38
11	Ensaio .....	40
11.1	Condições gerais para os ensaios de rotina, tipo e especiais .....	40
11.1.1	Ensaio de rotina.....	40
11.1.2	Ensaio de tipo .....	41
11.1.3	Ensaio especiais.....	41
11.2	Medição da resistência dos enrolamentos .....	42
11.2.1	Generalidades .....	42
11.2.2	Transformadores do tipo seco .....	42
11.2.3	Transformadores imersos em óleo.....	42
11.3	Medição da relação de transformação, polaridade e verificação do deslocamento angular e sequência de fase .....	43
11.4	Medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga.....	43
11.5	Medição de perdas em vazio e corrente de excitação.....	43
11.6	Medição de harmônicas da corrente de excitação .....	44
11.7	Medição de impedância(s) de sequência zero em transformadores trifásicos .....	44
11.8	Ensaio no comutador em carga .....	45
11.8.1	Ensaio funcional .....	45
11.8.2	Ensaio de isolamento dos circuitos auxiliares .....	45
11.9	Resistência de isolamento .....	45
11.10	Estanqueidade e resistência à pressão .....	45
11.10.1	Estanqueidade e resistência à pressão a quente (transformadores subterrâneos) .....	46
11.10.2	Verificação do funcionamento dos acessórios.....	46
11.11	Ensaio de óleo mineral isolante.....	46
11.12	Verificação da espessura e aderência da pintura das partes externa e interna.....	47
11.12.1	Para transformadores com $U_m \geq 242$ kV.....	47
11.12.2	Para transformadores com $U_m < 242$ kV.....	47
11.13	Análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante.....	47
11.14	Vácuo interno.....	47
11.15	Ensaio de nível de tensão de radiointerferência.....	48
11.16	Determinação das capacitâncias entre enrolamentos e a terra e entre os enrolamentos .....	48
11.17	Determinação das características da tensão transitória transferida .....	48
11.18	Determinação do nível de ruído audível.....	48
11.19	Medição da potência absorvida pelos motores das bombas e dos ventiladores .....	48
11.20	Medição do fator de potência do isolamento .....	48
11.21	Medição de resposta em frequência e impedância terminal.....	48
11.21.1	Medição da resposta em frequência.....	48
11.21.2	Medição da impedância terminal .....	48
11.22	Ensaio do grau de polimerização do papel.....	49
11.23	Medição do ponto de orvalho.....	49
11.24	Levantamento da curva de magnetização e medição da reatância em núcleo de ar.....	49

<b>Anexo A (normativo) Informações a serem fornecidas em especificações técnicas e pedidos de compra...</b>	<b>53</b>
<b>A.1 Características nominais e requisitos gerais .....</b>	<b>53</b>
<b>A.1.1 Condições normais .....</b>	<b>53</b>
<b>A.1.2 Condições particulares .....</b>	<b>54</b>
<b>A.2 Operação em paralelo .....</b>	<b>55</b>
<b>A.3 Folha de dados técnicos .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo B (informativo) Exemplos de especificações de transformadores com derivações .....</b>	<b>57</b>
<b>B.1 Exemplo 1 – Variação de tensão a fluxo constante (VTFC) .....</b>	<b>57</b>
<b>B.2 Exemplo 2 – Variação de tensão a fluxo variável (VTFV) .....</b>	<b>57</b>
<b>B.3 Exemplo 3 – Variação combinada de tensão (VCT) .....</b>	<b>58</b>
<b>Anexo C (informativo) Especificação de impedância de curto-circuito por limites .....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo D (normativo) Influência da temperatura nas perdas em carga .....</b>	<b>60</b>
<b>Anexo E (normativo) Métodos de ensaio .....</b>	<b>62</b>
<b>E.1 Generalidades .....</b>	<b>62</b>
<b>E.2 Resistência elétrica dos enrolamentos .....</b>	<b>62</b>
<b>E.3 Relação de transformação .....</b>	<b>63</b>
<b>E.3.1 Generalidades .....</b>	<b>63</b>
<b>E.3.2 Método do voltímetro .....</b>	<b>63</b>
<b>E.3.3 Método do transformador-padrão .....</b>	<b>64</b>
<b>E.3.4 Método do transformador de referência de relação variável .....</b>	<b>65</b>
<b>E.3.5 Método potenciométrico .....</b>	<b>65</b>
<b>E.4 Resistência de isolamento .....</b>	<b>65</b>
<b>E.5 Polaridade .....</b>	<b>66</b>
<b>E.6 Deslocamento angular .....</b>	<b>68</b>
<b>E.7 Sequência de fases para transformadores polifásicos .....</b>	<b>71</b>
<b>E.8 Perdas em vazio e corrente de excitação .....</b>	<b>71</b>
<b>E.9 Perdas em carga e impedância de curto-circuito .....</b>	<b>76</b>
<b>E.9.1 Transformadores monofásicos de dois enrolamentos .....</b>	<b>76</b>
<b>E.9.2 Transformadores trifásicos de dois enrolamentos .....</b>	<b>78</b>
<b>E.9.3 Autotransformadores monofásicos e trifásicos .....</b>	<b>78</b>
<b>E.9.4 Transformadores de três enrolamentos e autotransformadores com terciário .....</b>	<b>80</b>
<b>E.9.5 Ensaio com corrente reduzida .....</b>	<b>81</b>
<b>E.10 Ensaio dielétrico .....</b>	<b>81</b>
<b>E.10.2 Tensão suportável nominal ao impulso atmosférico .....</b>	<b>82</b>
<b>E.10.3 Tensão suportável nominal ao impulso atmosférico de onda cortada .....</b>	<b>82</b>
<b>E.10.4 Impulso de manobra .....</b>	<b>82</b>
<b>E.11 Estanqueidade e resistência à pressão interna e estanqueidade a quente .....</b>	<b>82</b>
<b>E.11.1 Ensaio à temperatura ambiente .....</b>	<b>82</b>
<b>E.11.2 Ensaio a quente (transformadores subterrâneos) .....</b>	<b>83</b>
<b>E.12 Fator de potência do isolamento .....</b>	<b>83</b>
<b>E.13 Elevação de temperatura .....</b>	<b>85</b>
<b>E.14 Ensaio de curto-circuito .....</b>	<b>85</b>
<b>E.15 Medição da impedância de sequência zero .....</b>	<b>85</b>
<b>E.15.1 Transformadores com dois enrolamentos .....</b>	<b>85</b>
<b>E.15.2 Transformadores com mais de dois enrolamentos .....</b>	<b>88</b>
<b>E.15.3 Apresentação dos resultados .....</b>	<b>91</b>
<b>E.16 Acessórios .....</b>	<b>91</b>
<b>E.16.1 Indicador externo de nível de óleo .....</b>	<b>91</b>
<b>E.16.2 Indicador de temperatura do óleo .....</b>	<b>91</b>
<b>E.16.3 Relé detector de gás tipo Buchholz ou equivalente – Verificação da atuação dos contatos .....</b>	<b>91</b>
<b>E.16.4 Indicador de temperatura do enrolamento .....</b>	<b>91</b>
<b>E.16.5 Comutador sem tensão .....</b>	<b>92</b>
<b>E.16.6 Ventilador .....</b>	<b>92</b>
<b>E.16.7 Bomba de óleo .....</b>	<b>92</b>
<b>E.16.8 Indicador de circulação de óleo .....</b>	<b>92</b>
<b>E.16.9 Dispositivo para alívio de pressão .....</b>	<b>92</b>
<b>E.16.10 Comutadores de derivações em carga .....</b>	<b>92</b>
<b>E.17 Medição do nível de ruído .....</b>	<b>92</b>

E.18	Medição de harmônicos na corrente de excitação .....	93
E.19	Medição da potência absorvida pelos motores de bombas de óleo e ventiladores .....	93
E.20	Medição de resposta em frequência e impedância terminal.....	93
E.20.1	Medição da resposta em frequência.....	93
E.20.2	Medição da impedância terminal .....	93
E.21	Ensaio do grau de polimerização do papel.....	93
E.22	Medição do ponto de orvalho.....	93
E.23	Levantamento da curva de magnetização e medição da reatância em núcleo de ar.....	93
E.24	Medição dos gases dissolvidos no óleo isolante .....	93
E.25	Medição do nível de tensão de radiointerferência .....	93
E.26	Ensaio de verificação da pintura externa e interna de transformadores .....	94
E.26.1	Espessura.....	94
E.26.2	Aderência .....	94
E.26.3	Outros ensaios.....	94
E.26.4	Umidade.....	94
E.26.5	Impermeabilidade .....	94
E.26.6	Brisa marítima.....	94
E.27	Regulação e rendimento .....	94
E.27.1	Regulação.....	94
E.27.2	Rendimento .....	95
E.28	Ensaio de vácuo interno .....	95





## Prefácio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais Temporárias (ABNT/CEET), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidades, laboratórios e outros).

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da Diretivas ABNT, Parte 2.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) chama atenção para a possibilidade de que alguns dos elementos deste documento podem ser objeto de direito de patente. A ABNT não deve ser considerada responsável pela identificação de quaisquer direitos de patentes.

A ABNT NBR 5356-1 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03), pela Comissão de Estudo de Transformadores de Potência do ABNT/CB (CE-03:014.01). O seu 1º Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 06, de 01.06.2006, com o número de Projeto ABNT NBR 5356-1. O seu 2º Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 07, de 23.06.2007 a 23.07.2007, com o número de 2º Projeto ABNT NBR 5356-1.

Esta Norma é baseada na IEC 60076-1:2000.

Esta Norma cancela e substitui a ABNT NBR 5380:1993.

A ABNT NBR 5356, sob o título geral "*Transformadores de potência*", tem previsão de conter as seguintes partes:

- Parte 1: Generalidades;
- Parte 2: Aquecimento;
- Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar;
- Parte 4: Guia para ensaios de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores;
- Parte 5: Capacidade de resistir a curtos-circuitos;
- Parte 6: Reatores;
- Parte 7: Carregamento de transformadores;
- Parte 8: Guia de aplicação.

Esta primeira edição da ABNT NBR 5356-1 cancela e substitui a primeira edição da ABNT NBR 5356:1993, a qual foi tecnicamente revisada e desmembrada em partes.

Esta versão corrigida da ABNT NBR 5356-1:2007 incorpora a Errata 1 de 02.07.2010.





# Transformadores de potência

## Parte 1: Generalidades

### 1 Escopo

Esta parte da ABNT NBR 5356, em conjunto com as ABNT NBR 5356-2, 3, 4 e 5, aplica-se a transformadores trifásicos e monofásicos (inclusive autotransformadores), excetuando-se certas categorias de pequenos transformadores e transformadores especiais, tais como:

- transformadores monofásicos de potência nominal inferior a 1 kVA e transformadores trifásicos de potência nominal inferior a 5 kVA;
- transformadores para instrumentos;
- transformadores para conversores estáticos;
- transformadores de tração montados sobre componente rolante;
- transformadores de partida;
- transformadores de ensaios;
- transformadores de solda.

Quando não existirem Normas Brasileiras para estas categorias de transformadores, todas as partes da ABNT NBR 5356 podem ainda ser aplicadas como um todo ou em partes.

Para aquelas categorias de transformadores de potência e reatores que dispõem de uma Norma Brasileira específica, essas partes são aplicáveis unicamente na medida em que é feita referência explícita em outra norma.

Em vários locais destas partes, é prescrito ou recomendado que um acordo deve ser obtido no que concerne a soluções técnicas ou procedimentos adicionais. Tal acordo é estabelecido entre o fabricante e o comprador. É recomendado que estas questões sejam levantadas suficientemente cedo e que os acordos sejam incluídos na especificação do contrato.

### 2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 5034:1989, *Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kV – Especificação*

ABNT NBR 5356-2:2007, *Transformadores de potência – Parte 2: Aquecimento*

ABNT NBR 5356-3:2007, *Transformadores de potência – Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar*

ABNT NBR 5356-4:2007, *Transformadores de potência – Parte 4: Guia para ensaios de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores – Procedimento*

ABNT NBR 5356-5:2007, *Transformadores de potência – Parte 5: Capacidade de resistir a curto-circuito*

ABNT NBR 5416:1997, *Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimento*

ABNT NBR 5440:1999, *Transformadores para redes aéreas de distribuição – Características elétricas e mecânicas – Padronização*

ABNT NBR 5458:1986, *Transformadores de potência – Terminologia*

ABNT NBR 5590:1995, *Tubos de aço carbono com requisitos de qualidade para condução de fluidos – Especificação*

ABNT NBR 5755:1995, *Líquidos isolantes – Determinação de água – Método de Karl Fischer – Método de ensaio*

ABNT NBR 5915:2003, *Chapas finas a frio de aço carbono para estampagem – Especificação*

ABNT NBR 6234:1965, *Óleo-água – Determinação da tensão interfacial – Método de ensaio*

ABNT NBR 6648:1984, *Chapa grossas de aço carbono para uso industrial*

ABNT NBR 6650:1986, *Chapas finas a quente de aço carbono para uso industrial*

ABNT NBR 6869:1989, *Líquidos isolantes elétricos – Determinação da rigidez dielétrica (eletrodo de disco) – Método de ensaio*

ABNT NBR 6936:1992, *Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Procedimento*

ABNT NBR 6937:1981, *Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Dispositivos de medição – Procedimento*

ABNT NBR 7036:1992, *Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de distribuição, imersos em líquido isolante – Procedimento*

ABNT NBR 7037:1993, *Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência em óleo isolante mineral – Procedimento*

ABNT NBR 7070:1981, *Guia para amostragem de gases e óleo em transformadores e análise dos gases dissolvidos – Procedimento*

ABNT NBR 7277:1992, *Medição do nível de ruído de transformadores e reatores – Método de ensaio*

ABNT NBR 7876:1983, *Linha e equipamento elétricos – Medição da tensão de radiointerferência*

ABNT NBR 8148:2000, *Ensaio do grau de polimerização do papel – Método de ensaio*

ABNT NBR 8153:1983, *Guia de aplicação de transformadores de potência – Procedimento*

ABNT NBR 10295:1988, *Transformadores de potência secos – Especificação*

ABNT NBR 10443:1988, *Tintas e vernizes – Determinação da espessura da película seca – Método de ensaio*

ABNT NBR 11003:1990, *Tintas – Determinação da aderência – Método de ensaio*

ABNT NBR 11388:1993, *Sistemas de pintura para equipamentos e instalações de subestações de equipamentos elétricos*

ABNT NBR 11888:1992, *Bobinas finas e chapas finas de aço-carbono e de aço baixa liga e alta resistência – Requisitos gerais*

ABNT NBR 11889:1992, *Bobinas grossas e chapas grossas de aço-carbono e de aço de baixa liga e alta resistência – Requisitos gerais*

ABNT NBR IEC 60529:2005, *Graus de proteção para Invólucros de equipamentos elétricos (Código IP)*

ABNT NBR IEC 60156:2004, *Líquidos isolantes – Determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial – Método de ensaio*

IEC 60247:2004, *Insulating liquids – Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ( $\tan \delta$ ) and d.c. resistivity*

CISPR 16-SER:2004, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – All Parts*

ASTM D924:2003a, *Standard test method for dissipation factor (or power factor) and relative permittivity (Dielectric constant) of electrical insulating liquids*

ASTM D1014:2002, *Standard practice for conducting exterior exposure tests of paints and coatings on metal substrates*

ASTM D1735:2002, *Standard practice for testing water resistance of coatings using water fog apparatus*

ASTM D3515:2001, *Standard specification for hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures*

### 3 Termos e definições

Para os efeitos desta parte da ABNT NBR 5356, aplicam-se os termos e definições da ABNT NBR 5458 e os seguintes.

#### 3.1 Generalidades

##### 3.1.1

##### **transformador de potência**

equipamento estático com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternadas em outro sistema de tensão e corrente, de valores geralmente diferentes mas à mesma frequência, com o objetivo de transmitir potência elétrica

##### 3.1.2

##### **autotransformador<sup>1)</sup>**

transformador no qual pelo menos dois enrolamentos têm uma parte comum

##### 3.1.3

##### **transformador de reforço (série)**

transformador no qual um enrolamento é ligado em série num circuito, com o objetivo de modificar a tensão e/ou o deslocamento angular. O outro enrolamento é um enrolamento de excitação, alimentado por um outro circuito

##### 3.1.4

##### **transformador imerso em óleo**

transformador no qual o circuito magnético e enrolamentos são imersos em óleo

NOTA No contexto desta Norma, todo líquido isolante, óleo mineral ou outro produto são considerados como óleo.

<sup>1)</sup> Quando existir a necessidade de expressar que um transformador não é autotransformador, recorre-se a termos tais como enrolamentos separados ou transformador de enrolamento duplo.

### 3.1.5

#### **transformador do tipo seco**

transformador no qual o circuito magnético e os enrolamentos não são imersos em líquido isolante

### 3.1.6

#### **sistema de preservação de óleo**

sistema que absorve a dilatação térmica do óleo, podendo impedir ou diminuir o contato entre o óleo e o ar ambiente (em um transformador imerso em óleo isolante)

## 3.2 Terminais e ponto de neutro

### 3.2.1

#### **terminal**

elemento condutor destinado a conectar um enrolamento a condutores externos

### 3.2.2

#### **terminal de linha**

terminal destinado à conexão a um condutor de linha de uma rede

### 3.2.3

#### **terminal de neutro**

para transformadores trifásicos e grupos trifásicos constituídos de transformadores monofásicos: Terminal ou terminais conectados ao ponto comum (ponto de neutro) de enrolamentos ligados em estrela ou zigzag; ou

para transformadores monofásicos: Terminais destinados a serem conectados ao ponto de neutro de uma rede.

### 3.2.4

#### **ponto de neutro**

ponto de um sistema simétrico de tensões que está normalmente sob potencial zero

### 3.2.5

#### **terminais correspondentes**

terminais de enrolamentos diferentes de um transformador, marcados com o mesmo índice numérico e letras diferentes

## 3.3 Enrolamentos

### 3.3.1

#### **enrolamento**

conjunto de espiras que constituem um circuito elétrico associado a uma das tensões para as quais o transformador foi concebido

NOTA Para um transformador trifásico, "enrolamento" é o conjunto dos enrolamentos das fases (ver 3.3.3).

### 3.3.2

#### **enrolamento de derivação**

enrolamento tal que o número de espiras pode ser modificado em degraus

### 3.3.3

#### **enrolamento de fase**

conjunto de espiras formando uma fase de um enrolamento trifásico

NOTA O termo "enrolamento de fase" não deve ser utilizado para designar o conjunto de bobinas de uma determinada coluna.

**3.3.4****enrolamento de alta-tensão<sup>2)</sup>**

enrolamento de tensão nominal mais elevada

**3.3.5****enrolamento de baixa-tensão<sup>1)</sup>**

enrolamento de tensão nominal menos elevada

NOTA Para um transformador de reforço, o enrolamento de tensão nominal inferior pode ser aquele de maior nível de isolamento.

**3.3.6****enrolamento de tensão intermediária**

em transformadores de mais de dois enrolamentos, é o enrolamento de tensão nominal intermediária entre a mais elevada e a mais baixa das tensões nominais

**3.3.7****enrolamento auxiliar**

enrolamento adicional previsto para uma carga baixa comparada à potência nominal do transformador

**3.3.8****enrolamento de estabilização**

enrolamento suplementar em triângulo, utilizado em um transformador com ligações estrela-estrela ou estrela-zigzague, com o objetivo de se reduzir sua impedância de sequência zero (ver 3.7.3)

NOTA Um enrolamento somente é considerado um enrolamento de estabilização se não for destinado a ser conectado a um circuito externo através de ligações trifásicas.

**3.3.10****enrolamento comum**

parte comum dos enrolamentos de um autotransformador

**3.3.11****enrolamento série**

parte do enrolamento de um autotransformador ou enrolamento de um transformador de reforço que é destinada a ser conectada em série com um circuito

**3.3.12****enrolamento de excitação**

enrolamento de um transformador de reforço que é destinado a fornecer potência ao enrolamento série

**3.4 Características nominais****3.4.1****característica nominal**

conjunto de valores numéricos atribuídos às grandezas que definem o funcionamento de um transformador, nas condições especificadas nesta Norma, e que servem de base para os valores garantidos pelo fabricante e para os ensaios

---

<sup>2)</sup> O enrolamento que recebe potência ativa da fonte de alimentação em serviço é chamado de “enrolamento primário”, e aquele que fornece potência ativa a uma carga é chamado de “enrolamento secundário”. Estes termos não possuem nenhum significado quanto a qual dos enrolamentos possui maior tensão nominal e não devem ser utilizados, exceto no contexto da direção do fluxo de potência ativa. Um enrolamento suplementar no transformador, usualmente de menor valor de tensão nominal que o enrolamento secundário, é então freqüentemente chamado de “enrolamento terciário”, (ver também 3.3.8).



### 3.4.2

#### grandezas nominais

grandezas (tensão, corrente etc.) cujos valores numéricos definem as características nominais

NOTA 1 Para transformadores com derivações, grandezas nominais são referidas à derivação principal (ver 3.5.2), salvo especificação em contrário. Grandezas correspondentes com significados análogos, referidas a outra derivação específica, são chamadas grandezas de derivação (ver 3.5.10).

NOTA 2 Tensões e correntes são sempre expressas pelo seu valor eficaz, salvo especificação em contrário.

### 3.4.3

#### tensão nominal de um enrolamento

$U_n$

tensão nominal a ser aplicada, ou desenvolvida, em vazio, entre os terminais de um enrolamento sem derivações, ou de um enrolamento com derivações ligado na derivação principal (ver 3.5.2). Para um enrolamento trifásico, é a tensão entre terminais de linha

NOTA 1 As tensões nominais de todos os enrolamentos surgem simultaneamente no funcionamento em vazio, quando a tensão aplicada a um deles tem seu valor nominal.

NOTA 2 No caso de transformadores monofásicos destinados a serem ligados em estrela para constituir um banco trifásico, a tensão nominal é indicada pela tensão entre fases dividida por  $\sqrt{3}$ , por exemplo  $U_n = 400/\sqrt{3}$  kV.

NOTA 3 Para o enrolamento série de um transformador de reforço trifásico, que é constituído de enrolamentos de fases independentes (ver 3.10.5), a tensão nominal é indicada como se o enrolamento estivesse ligado em estrela, por exemplo  $U_n = 23/\sqrt{3}$  kV.

### 3.4.4

#### relação de tensões nominal

relação entre a tensão nominal de um enrolamento e a de um outro enrolamento de tensão nominal inferior ou igual

### 3.4.5

#### frequência nominal

$f_n$

frequência para a qual o transformador é projetado para operar

### 3.4.6

#### potência nominal

$S_n$

valor da potência aparente atribuída a um enrolamento, que juntamente com a tensão nominal desse enrolamento determina sua corrente nominal

NOTA 1 Os dois enrolamentos de um transformador de dois enrolamentos têm a mesma potência nominal, que, por definição, é a potência nominal do transformador.

NOTA 2 No caso de transformadores de mais de dois enrolamentos, dividindo-se por dois a soma aritmética das potências nominais de todos os enrolamentos (enrolamentos separados, não autoconectados), obtém-se uma estimativa da potência de um transformador de dois enrolamentos equivalentes.

### 3.4.7

#### corrente nominal

$I_n$

corrente que percorre um terminal de linha de um enrolamento, determinada a partir da potência nominal  $S_n$  e da tensão nominal  $U_n$  deste enrolamento

NOTA 1 Para um enrolamento trifásico, a corrente nominal  $I_n$  é obtida por:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_n} \quad \text{A}$$

NOTA 2 Para os enrolamentos de transformadores monofásicos a corrente nominal  $I_n$  é obtida por:

$$I_n = \frac{S_n}{U_n} \quad \text{A}$$

### 3.5 Derivações

#### 3.5.1

##### **derivação**

em um transformador com enrolamento de derivações, qualquer ponto de conexão desse enrolamento. Em consequência, é estabelecida uma relação definida de espiras entre esse enrolamento e qualquer outro enrolamento que possua um número fixo de espiras

NOTA Uma das derivações é a derivação principal e as outras derivações são definidas com relação à derivação principal, em função de seus respectivos fatores de derivação. Ver definições destes termos a seguir.

#### 3.5.2

##### **derivação principal**

derivação à qual se referem as grandezas nominais

#### 3.5.3

##### **fator de derivação (correspondente a uma dada derivação)**

as relações:

$$\frac{U_d}{U_n} \text{ (Fator de derivação)} \quad \text{ou} \quad 100 \frac{U_d}{U_n} \text{ (Fator de derivação expresso em porcentagem)}$$

onde:

$U_n$  é a tensão nominal do enrolamento (ver 3.4.3);

$U_d$  é a tensão induzida em vazio entre os terminais do enrolamento, na derivação considerada, aplicando-se a tensão nominal do outro enrolamento ligado na sua derivação principal.

NOTA Esta definição não é apropriada em relação a enrolamentos série de um transformador de reforço (ver 3.1.3) e, neste caso, a notação percentual refere-se à tensão do enrolamento de excitação ou do enrolamento do transformador associado.

#### 3.5.4

##### **derivação superior**

derivação em que o fator de derivação é maior que 1

#### 3.5.5

##### **derivação inferior**

derivação em que o fator de derivação é menor que 1

#### 3.5.6

##### **degrau de derivação**

diferença entre fatores de derivação de duas derivações adjacentes, expressa em porcentagem



### 3.5.7

#### faixa de derivação

faixa de variação entre os fatores de derivação extremos, expressos em porcentagem

NOTA Se os fatores de derivação extremos forem  $(100 + a) \%$  e  $(100 - b) \%$ , a faixa de derivação é  $+ a \%$ ,  $- b \%$  ou  $\pm a \%$  (quando  $a = b$ ).

### 3.5.8

#### relação de tensões de derivação (de um par de enrolamentos)

- Relação de tensões nominal multiplicada pelo fator de derivação de um enrolamento com derivações, se este for o de alta tensão;
- Relação de tensões nominal dividida pelo fator de derivação de um enrolamento com derivações, se este for o de baixa tensão.

NOTA Enquanto que a relação de tensão nominal é, por definição, no mínimo igual a 1, a relação de tensão de derivação pode ser menor que 1, para certas derivações, quando a relação de tensão nominal é próxima a 1.

### 3.5.9

#### característica de derivação

conjunto de valores numéricos atribuídos às grandezas análogas e às grandezas nominais, correspondentes a outras derivações que não a derivação principal

### 3.5.10

#### grandezas de derivação

grandezas cujos valores numéricos definem a característica da derivação, que não a derivação principal

As grandezas de derivação são:

- tensão de derivação (similar à tensão nominal, ver 3.4.3);
- potência de derivação (similar à potência nominal, ver 3.4.6);
- corrente de derivação (similar à corrente nominal, ver 3.4.7).

### 3.5.11

#### derivação de plena potência

derivação cuja potência de derivação é igual à potência nominal

### 3.5.12

#### derivação de potência reduzida

derivação cuja potência de derivação é menor que a potência nominal

### 3.5.13

#### comutador de derivações em carga

dispositivo para mudança das derivações de um enrolamento, adequado para operação com o transformador energizado com ou sem carga

### 3.5.14

#### comutador de derivações sem tensão

dispositivo para mudança das derivações de um enrolamento, adequado para operação com o transformador desenergizado

### 3.6 Perdas e corrente de excitação

NOTA Os valores se reportam à derivação principal, salvo se outra derivação for especificada.

#### 3.6.1

##### **perdas em vazio**

potência ativa absorvida quando a tensão nominal (tensão de derivação) à frequência nominal é aplicada aos terminais de um enrolamento, estando o(s) outro(s) enrolamento(s) em circuito aberto

#### 3.6.2

##### **corrente de excitação**

valor eficaz da corrente que flui através do terminal de linha de um enrolamento, quando a tensão nominal (tensão de derivação) à frequência nominal é aplicada a este enrolamento, estando o(s) outro(s) enrolamento(s) em circuito aberto

NOTA Para um transformador trifásico, este valor representa a média aritmética dos valores das correntes nas três fases. A corrente de excitação de um enrolamento é freqüentemente expressa em porcentagem da corrente nominal deste enrolamento. Para os transformadores de mais de dois enrolamentos, esta porcentagem é referenciada ao enrolamento de potência nominal mais elevada.

#### 3.6.3

##### **perdas em carga**

potência ativa absorvida, relativa a um par de enrolamentos, à frequência nominal e à temperatura de referência (ver 11.1), quando a corrente nominal (corrente de derivação) flui através do terminal de linha de um dos enrolamentos, e estando os terminais do outro enrolamento curto-circuitados. Os demais enrolamentos devem estar em circuito aberto

NOTA 1 Para um transformador com dois enrolamentos, existe apenas uma combinação de enrolamentos e um valor de perdas em carga. Para um transformador de mais de dois enrolamentos, existem vários valores de perdas em carga, correspondentes às diferentes combinações de dois enrolamentos. O valor de perdas em carga para o transformador completo corresponde a uma combinação dada de cargas nos diferentes enrolamentos. Em geral, este valor não pode ser determinado por meio de ensaios diretos, mas é obtido por cálculo conforme mostrado no Anexo E.

NOTA 2 Quando os enrolamentos do par possuem potências nominais diferentes, as perdas em carga são referidas à corrente nominal do enrolamento com a menor potência nominal, mencionando-se a potência de referência.

#### 3.6.4

##### **perdas totais**

soma das perdas em vazio e das perdas em carga

NOTA A potência consumida pelos equipamentos auxiliares não está inclusa nas perdas totais e deve ser indicada separadamente.

### 3.7 Impedância de curto-circuito, queda de tensão e impedância de sequência zero

#### 3.7.1

##### **impedância de curto-circuito (de um par de enrolamentos)**

impedância série equivalente,  $Z = R + jX$ , expressa em ohms, à frequência nominal e à temperatura de referência, medida entre os terminais de um enrolamento, enquanto os terminais do outro enrolamento são curto-circuitados e os demais enrolamentos, caso existam, estão em circuito aberto. Para um transformador trifásico, a impedância é expressa como uma impedância de fase (ligação estrela equivalente)

Para um transformador com enrolamento de derivação, a impedância de curto-circuito é referida a uma derivação particular. Salvo especificação em contrário, esta derivação é a derivação principal.

NOTA A impedância ( $Z = R + jX$ ) pode ser expressa sob uma forma adimensional, em valor percentual, como uma fração  $z$  da impedância de referência  $Z_{ref}$  do mesmo enrolamento do par, conforme equação abaixo:

$$z = 100 \frac{Z}{Z_{ref}}$$

Onde:

$$Z_{ref} = \frac{U^2}{S_n}$$

(Fórmula válida para transformadores trifásicos e monofásicos)

$U$  é a tensão (tensão nominal ou tensão da derivação) do enrolamento referente a  $Z$  e  $Z_{ref}$ ;

$S_n$  é o valor de referência da potência nominal.

O valor relativo é também igual ao quociente da tensão aplicada durante o ensaio de curto-circuito para se fazer circular a corrente nominal (ou corrente de derivação), pela tensão nominal (ou tensão de derivação). Esta tensão corresponde à tensão de curto-circuito do par de enrolamentos. Ela é normalmente expressa em porcentagem.

### 3.7.2

#### queda ou elevação da tensão para uma condição especificada de carga (regulação)

diferença aritmética entre a tensão em vazio de um enrolamento e a tensão em carga desenvolvida nos terminais do mesmo enrolamento para uma corrente de carga e fator de potência especificados, sendo a tensão aplicada ao(s) outro(s) enrolamento(s) igual:

- ao seu valor nominal, se o transformador estiver conectado à derivação principal (a tensão em vazio do primeiro enrolamento é portanto igual ao seu valor nominal);
- à tensão de derivação, se o transformador estiver conectado em outra derivação.

Esta diferença se exprime geralmente sob a forma de porcentagem da tensão em vazio do primeiro enrolamento.

NOTA Para transformadores de mais de dois enrolamentos, a queda ou elevação de tensão depende não somente da carga e do fator de potência do enrolamento, mas também da carga e do fator de potência dos outros enrolamentos.

### 3.7.3

#### impedância de sequência zero (de um enrolamento trifásico)

impedância, expressa em ohms por fase, à frequência nominal, entre os terminais de linha de um transformador trifásico conectado em estrela ou zigzague ligados entre si e seu terminal de neutro

NOTA 1 A impedância de sequência zero pode apresentar diversos valores, porque ela depende da forma com que os outros enrolamentos são conectados, carregados e do tipo construtivo do transformador (monofásicos em banco trifásico).

NOTA 2 A impedância de sequência zero pode depender do valor da corrente e da temperatura, em particular para transformadores sem enrolamentos conectados em triângulo.

NOTA 3 A impedância de sequência zero pode também ser expressa em valores relativos, da mesma forma que a impedância de curto-circuito (seqüência positiva) (ver 3.7.1).

### 3.8

#### elevação de temperatura

diferença entre a temperatura da parte considerada e a temperatura do meio de resfriamento externo

### 3.9

#### isolamento

para definições relativas a isolamento, ver ABNT NBR 5356-3

### 3.10 Ligações

#### 3.10.1

##### **ligação estrela (ligação Y)**

ligação de enrolamentos na qual uma extremidade de cada enrolamento de fase de um transformador trifásico, ou de cada enrolamento de mesma tensão nominal de transformadores monofásicos constituindo um banco trifásico, é conectada a um ponto comum (ponto de neutro), estando a outra extremidade ligada ao terminal de linha correspondente

#### 3.10.2

##### **ligação triângulo ou ligação delta (ligação D)**

ligação em série dos enrolamentos de fase de um transformador trifásico, ou de enrolamentos de mesma tensão nominal de transformadores monofásicos constituindo um banco trifásico, efetuado de modo a formar um circuito fechado

#### 3.10.3

##### **ligação triângulo aberto ou delta aberto**

ligação em série de enrolamentos em que os enrolamentos de fase de um transformador trifásico, ou os enrolamentos de mesma tensão nominal de transformadores monofásicos constituindo um banco trifásico, são conectados em triângulo sem fechamento de um dos vértices

#### 3.10.4

##### **ligação V**

ligação, entre si, das extremidades de polaridades opostas dos enrolamentos de mesma tensão nominal, de dois transformadores monofásicos, de tal modo que o ponto comum e as duas extremidades livres formem o equivalente a uma ligação triângulo

#### 3.10.5

##### **ligação ziguezague (ligação Z)**

ligação dos enrolamentos tal que uma extremidade de cada enrolamento de fase de um transformador trifásico é ligada a um ponto comum (ponto de neutro) e onde cada enrolamento de fase comporta duas partes nas quais são induzidas tensões defasadas

NOTA Estas duas partes são normalmente de mesmo número de espiras.

#### 3.10.6

##### **enrolamento de fases independentes**

enrolamentos de fase de um transformador trifásico, que não são conectados no interior do transformador

#### 3.10.7

##### **deslocamento angular**

diferença angular entre os fasores que representam as tensões entre o ponto de neutro (real ou fictício) e os terminais correspondentes de dois enrolamentos, quando um sistema de tensões de sequência positiva de tensões é aplicado aos terminais do enrolamento de mais alta tensão, em ordem de sequência alfabética, se eles forem identificados por letras ou em sequência numérica, se identificados por números. Convenciona-se que os fasores giram no sentido anti-horário

NOTA O fasor do enrolamento de mais alta tensão é tomado como referência e a defasagem de todos os outros enrolamentos é expressa por uma indicação horária, isto é, a hora indicada pelo fasor do enrolamento, considerando-se que o fasor do enrolamento de mais alta tensão está sobre a posição 12 h (quanto maior o número, maior a defasagem em atraso).

#### 3.10.8

##### **símbolos de ligação**

símbolos convencionados que indicam as formas de ligação dos enrolamentos de alta-tensão, tensões intermediárias, se existentes, e baixa tensão, e seus deslocamentos angulares, expressos como uma combinação de letras e indicações horárias

### 3.11 Ensaios

#### 3.11.1

##### **ensaio de rotina**

ensaio realizado em todas as unidades de produção

#### 3.11.2

##### **ensaio de tipo**

ensaio realizado em um transformador que representa os outros transformadores, com o objetivo de demonstrar que estes transformadores atendem às condições especificadas não cobertas pelos ensaios de rotina

NOTA Um transformador é considerado representante de outros transformadores, se for completamente idêntico em relação aos valores nominais e à construção. Ensaios de tipo podem ser considerados igualmente válidos, se efetuados em um transformador que apresente ligeiros desvios de valores nominais ou outras características. Estes desvios devem ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

#### 3.11.3

##### **ensaio especial**

ensaio outro que não ensaio de tipo nem de rotina, realizado mediante acordo entre fabricante e comprador

## 4 Condições de funcionamento

### 4.1 Condições normais de funcionamento

Esta Norma contém prescrições detalhadas para transformadores destinados a serem utilizados nas condições seguintes (ver Anexo A):

#### a) altitude:

Altitude não superior a 1 000 m;

#### temperatura ambiente e meio de resfriamento:

Temperatura do ar ambiente não inferior a 25 °C negativos e não superior a 40 °C, e temperatura média, em qualquer período de 24 h, não superior a 30 °C. No caso de transformadores resfriados à água, a temperatura da água de resfriamento (temperatura ambiente para o transformador) não superior a 30 °C e temperatura média, em qualquer período de 24 h, não superior a 25 °C; adicionalmente, temperatura mínima da água de resfriamento não inferior a 1 °C, exceto se forem utilizados anticongelantes adequados para funcionamento com temperatura de 20 °C negativos.

Limites suplementares para o resfriamento são dados:

- para transformadores imersos em óleo na ABNT NBR 5356-2;
- para transformadores secos na ABNT NBR 10295;

#### forma de onda da tensão de alimentação:

A forma de onda da tensão de alimentação deve ser praticamente senoidal;

NOTA Este requerimento normalmente não é muito crítico em sistemas de potência, mas deve ser considerado em instalações com cargas especiais (por exemplo, conversores, fornos a arco, compensadores estáticos etc.). Nestes casos é regra comum que a distorção harmônica total não exceda 5 %, enquanto que o conteúdo de harmônicos pares deve ser inferior a 1 %.



corrente de carga:

A corrente de carga deve ser praticamente senoidal. Convém notar também a importância dos harmônicos de corrente para as perdas em carga e elevação de temperatura. Neste sentido, a distorção harmônica total da corrente secundária de carga não deve exceder 5 %;

simetria das tensões de alimentação trifásicas:

Para transformadores trifásicos, as tensões de alimentação trifásicas devem ser praticamente simétricas;

meio ambiente:

Um meio ambiente com baixo grau de poluição (ver ABNT NBR 5034) e que não exija a adoção de medidas particulares relativas ao isolamento das buchas ou do próprio transformador.

O ambiente não sujeito a abalos sísmicos que interfiram no projeto do transformador (quando a aceleração vertical for inferior a  $2 \text{ m/s}^2$ ).

## 4.2 Disposições para condições especiais de funcionamento

Quaisquer condições anormais de funcionamento que conduzam a considerações especiais no projeto de um transformador devem ser mencionadas na especificação técnica e pedido de compra. Estas podem ser: altitude elevada, temperatura muito elevada ou muito baixa, umidade elevada, atividade sísmica, grau de poluição severo, formas de onda de tensão e de corrente anormais, cargas intermitentes, sobreexcitação e subexcitação. Podem também ser consideradas condições de transporte, armazenagem e instalação, tais como limites de massa ou de dimensões (ver Anexo A).

Regras suplementares para regime nominal e condições de ensaios são dadas em outras Normas Brasileiras:

- para elevação de temperatura e resfriamento sob uma temperatura ambiente elevada ou altitude elevadas: ABNT NBR 5356-2 para transformadores imersos em óleo e ABNT NBR 10295 para transformadores do tipo seco;
- para isolamento externo à altitude elevada: ABNT NBR 5356-3 para transformadores imersos em óleo e ABNT NBR 10295 para transformadores do tipo seco.

## 5 Regime nominal

### 5.1 Potência nominal

É necessário atribuir uma potência nominal a cada enrolamento de um transformador e marcá-la na placa de identificação. A potência nominal corresponde a uma carga contínua. É um valor de referência para valores garantidos e ensaios de perdas em carga e elevação de temperatura.

Se valores diferentes de potência aparente forem citados em certas circunstâncias, por exemplo, com diferentes métodos de resfriamento, a potência nominal é aquela de maior valor.

Um transformador de dois enrolamentos tem somente um valor de potência nominal, idêntico para os dois enrolamentos.

Quando a tensão nominal é aplicada ao enrolamento primário e a corrente nominal flui nos terminais do enrolamento secundário, o transformador recebe a potência nominal correspondente a este par de enrolamentos.

O transformador deve ser capaz de fornecer, em regime contínuo, a potência nominal (para um transformador de mais de dois enrolamentos: as combinações especificadas de potência nominal dos enrolamentos) nas condições mencionadas na Seção 4 e sem ultrapassar os limites de elevação de temperatura especificados na ABNT NBR 5356-2.

NOTA A interpretação da potência nominal dada neste parágrafo implica tratar-se de uma potência aparente injetada no transformador, incluindo seu próprio consumo de potência ativa e reativa. A potência aparente que o transformador fornece ao circuito conectado a seu secundário, à carga nominal, difere da potência nominal. A tensão secundária difere da tensão nominal devido à queda (ou elevação) de tensão. Compensação da queda de tensão, levando em conta o fator de potência da carga, é dada na especificação da tensão nominal e da faixa de derivação.

## 5.2 Condições de carregamento

Caso solicitado nas especificações técnicas ou contrato, o transformador pode, além de sua potência nominal em carga contínua, ser submetido a um ciclo de carregamento temporário, e ser capaz de atender às condições especificadas na ABNT NBR 5356-2.

NOTA Esta opção é para ser utilizada em casos específicos, para fornecer critérios de projeto e de valores garantidos para grandes transformadores de potência, no caso de carregamento emergencial temporário além da potência nominal.

Na ausência de tais especificações, um guia de carregamento de transformadores com respeito a esta parte da ABNT NBR 5356 pode ser encontrado na ABNT NBR 5416.

Buchas, comutadores de derivação e outros equipamentos auxiliares devem ser selecionados de maneira a não restringir a capacidade de carregamento do transformador.

NOTA Estas prescrições não se aplicam a transformadores especiais, pois alguns não necessitam de capacidade de carregamento além da potência nominal. Para os demais, prescrições particulares são especificadas.

## 5.3 Valores preferenciais de potência nominal

A potência nominal deve ser especificada pelo comprador, respeitadas as padronizações das normas específicas.

## 5.4 Funcionamento à tensão superior à tensão nominal e/ou com variação de frequência

Dentro do valor prescrito para  $U_m$ <sup>3)</sup>, um transformador deve ser capaz de operar em regime permanente sem danos, com tensões ou frequências diferentes das nominais, nas seguintes condições:

- a) com tensão aplicada ao enrolamento primário e excedendo no máximo 5 % de sua tensão nominal, sob frequência nominal e à corrente secundária nominal;

com tensão aplicada ao enrolamento primário acima da tensão nominal, sob frequência abaixo da frequência nominal, mantida a corrente secundária nominal, observadas todas as seguintes condições:

- tensão primária e relação tensão/frequência não excedendo 105 % dos respectivos valores nominais;
- frequência superior ou igual a 57Hz;

com tensão aplicada ao enrolamento primário superior a 105 % da tensão nominal e inferior a 110 % desta sob frequência nominal; esta tensão, para uma corrente secundária igual a  $k$  vezes a corrente nominal, deve ser limitada ao valor dado pela seguinte fórmula:

$$U(\%) = 110 - 5k^2 \quad \text{onde:} \quad 0 < k < 1$$

NOTA No caso de funcionamento nas condições a), b) e c), o acréscimo resultante na elevação de temperatura é geralmente tão pequeno que pode ser desprezado.

3)  $U_m$  - para definição, ver ABNT NBR 5356-3:2007, 3.1.



com tensão primária 5 % abaixo da tensão nominal do enrolamento primário mantida a potência do enrolamento secundário, sob frequência nominal, sendo que, nesta condição, as elevações de temperatura das várias partes do transformador não devem ultrapassar em mais de 5 °C as elevações de temperatura obtidas em condições nominais;

em vazio, com tensão aplicada ao enrolamento primário igual a 110 % da sua tensão nominal, sob frequência nominal, sem que as elevações de temperatura ultrapassem os limites fixados em 4.2, Tabela 1, da ABNT NBR 5356-2:2007;

em vazio, com tensão aplicada ao enrolamento primário acima da tensão nominal, sob frequência abaixo da frequência nominal, desde que nem a tensão nem a relação tensão/frequência excedam 110 % dos respectivos valores nominais, sem que as elevações de temperatura ultrapassem os limites fixados em 4.2, Tabela 1, da ABNT NBR 5356-2:2007.

As disposições anteriores para derivação principal são aplicáveis a qualquer outra derivação, substituindo-se os termos “tensão nominal” por “tensão de derivação” e “corrente nominal” por “corrente de derivação”.

## 6 Requisitos para transformadores que possuam um enrolamento com derivação

### 6.1 Generalidades – Notação para faixa de derivação

Os parágrafos seguintes se aplicam aos transformadores nos quais somente um dos enrolamentos possui derivações.

Para transformadores com mais de dois enrolamentos, os requisitos se aplicam à combinação do enrolamento com derivações com um qualquer dos outros enrolamentos sem derivações.

Para autotransformadores, as derivações são algumas vezes localizadas no neutro, o que significa que o número de espiras é alterado simultaneamente nos dois enrolamentos. Para estes transformadores, as particularidades relativas às derivações devem ser objeto de acordo. É conveniente utilizar, na medida do possível, os requisitos desta subseção.

Salvo especificação em contrário, a derivação principal está situada no meio da faixa de derivação. As outras derivações são identificadas pelo fator de derivação. O número de derivações e a variação da relação de tensão podem ser expressos pela diferença do fator de derivação percentual com relação a 100 (para definição de termos, ver 3.5).

**EXEMPLO** Um transformador com derivações em um enrolamento de 160 kV com 21 derivações, dispostas simetricamente, é designado:

$$(160 \text{ kV} \pm 10 \times 1,5 \text{ \%})/66 \text{ kV}$$

Se por alguma razão a faixa de derivações for especificada assimetricamente em torno da tensão nominal, tem-se:

$$(160 \text{ kV} + 12 \times 1,5 \text{ \%,} - 8 \times 1,5 \text{ \%})/66 \text{ kV}$$

**NOTA** Esta forma de notação reduzida é somente uma descrição do arranjo do enrolamento com derivação e não implica variações reais da tensão aplicada nesse enrolamento em operação. Este assunto é tratado em 6.2 e 6.3.

Informações sobre a forma de apresentação na placa de identificação dos dados relativos as derivações são dadas na Seção 8.

Certas derivações podem tratar-se de “derivações de potência reduzida”, devido a restrições de tensão de derivação e corrente de derivação. As derivações extremas para as quais ocorrem estas restrições são chamadas “derivações de tensão máxima” e “derivações de máxima corrente” (ver Figura 1).

## 6.2 Tensão de derivação – Corrente de derivação - Categorias normalizadas de variação de tensão de derivação – Derivação de tensão máxima

A notação abreviada da faixa de derivação e degraus de derivação indicam a faixa de variação da relação do transformador. No entanto, os valores das grandezas de derivação não são completamente definidos por esta notação. Informações adicionais são necessárias. Estas podem ser dadas seja em forma tabular, contendo a potência de derivação, tensão de derivação e a corrente de derivação para cada derivação, ou como texto, indicando "a categoria de regulação de tensão" e os limites eventuais da faixa de "derivações de plena potência".

As categorias de regulação de tensão de derivação são:

- variação de tensão a fluxo constante (VTFC); e
- variação de tensão a fluxo variável (VTFV).

Estas são definidas como segue:

VTFC: A tensão é constante em todos os enrolamentos sem derivações em toda a faixa de derivação dos demais enrolamentos. As tensões de derivação, nos enrolamentos com derivações, são proporcionais aos fatores de derivação.

VTFV: A tensão é constante no enrolamento com derivações. Nos enrolamentos sem derivações, as tensões de derivação são inversamente proporcionais aos fatores de derivação.

VCT (Variação combinada de tensão): Em muitas aplicações e em particular para os transformadores com larga faixa de derivações, uma combinação dos dois princípios é aplicável a diferentes partes da faixa de derivação, e esta categoria é chamada de variação combinada de tensão (VCT). O ponto de descontinuidade é chamado "derivação de tensão máxima". Para esta categoria tem-se:

- VTFC se aplica para as derivações com fatores de derivação abaixo do fator da derivação de tensão máxima;
- VTFV se aplica para as derivações com fatores de derivação acima do fator da derivação de tensão máxima.

Apresentação gráfica das categorias de regulação de derivação são dadas na Figura 1a) (VTFC), Figura 1b) (VTFV) e Figura 1c) (VCT):

Nas Figuras, a seguinte notação é utilizada:

$U_A$ ,  $I_A$ : Tensão e corrente de derivação nos enrolamentos com derivações;

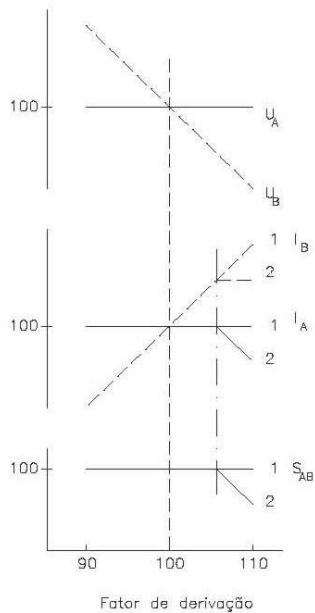
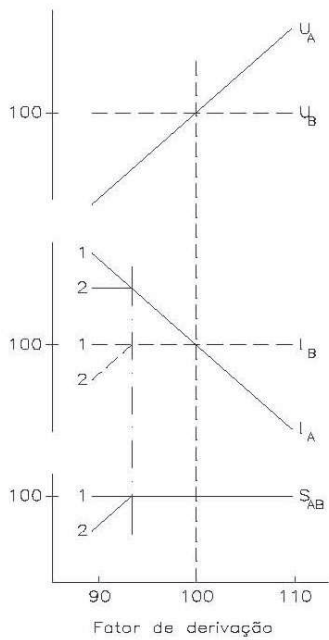
$U_B$ ,  $I_B$ : Tensão e corrente de derivação nos enrolamentos sem derivações;

$S_{AB}$ : Potência de derivação;

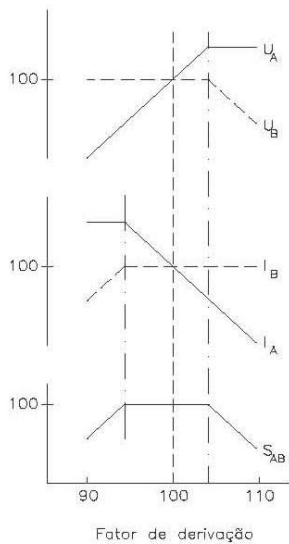
Abscissa: Fator de derivação, em percentagem (indicando o número relativo de espiras efetivas do enrolamento com derivações);

1: Indica as derivações a plena potência na faixa de derivações;

2: Indica as "derivações de tensão máxima", as "derivações de corrente máxima" e a faixa de derivações com potência reduzida.



**Figura 1-a – Variação de tensão a fluxo constante (VTFC)**      **Figura 1-b – Variação de tensão a fluxo variável (VTFV)**  
A linha 2 indica uma derivação opcional de máxima corrente      A linha 2 indica uma derivação opcional de máxima corrente



**Figura 1-c – Variação de tensão combinada (VCT)**

**Figura 1 — Variação de tensão**

### 6.3 Potência de derivação – Derivações a plena potência – Derivações de potência reduzida

Todas as derivações devem ser derivações de plena potência, salvo aquelas descritas a seguir.

Em transformadores de enrolamentos separados com uma faixa de derivações inferior a  $\pm 5\%$  e até 2 500 kVA, a corrente de derivação deve ser igual à corrente nominal para todas as derivações inferiores do enrolamento com derivações. Isto significa que a derivação principal é uma “derivação de máxima corrente” (ver abaixo).

Em transformadores com faixa de derivação maior que  $\pm 5\%$ , pode-se especificar restrições sobre os valores de tensão ou corrente de derivação que, sem isso, ultrapassariam muito os valores nominais. Quando estas restrições são especificadas, as derivações concernentes são chamadas “derivações de potência reduzida”. Esta seção descreve tais disposições.

Quando o fator de derivação se desvia da unidade, a corrente de derivação das derivações a plena potência pode ultrapassar a corrente nominal em um dos enrolamentos. Como ilustra a Figura 1a, isto se aplica às derivações inferiores para enrolamentos com derivações com regulação VTFC, e para as derivações superiores para enrolamentos com derivações com regulação VTFV (Figura 1b). Para evitar o sobredimensionamento do enrolamento em questão, é possível especificar uma derivação de máxima corrente. A partir desta derivação, os valores de corrente de derivação do enrolamento devem permanecer constantes, ou seja, as derivações restantes até a derivação extrema são derivações a potência reduzida (ver Figuras 1a, 1b e 1c).

Salvo especificado em contrário, com uma regulação VCT, a “derivação de máxima tensão”, ponto de mudança entre VTFC e VTFV, deve ser igualmente uma derivação “de máxima corrente”, quer-se dizer que a corrente do enrolamento sem derivação permanece constante até a derivação extrema superior (Figura 1c).

### 6.4 Especificação de derivações na especificação técnica e pedido de compra

Os seguintes dados são necessários para se definir o projeto de um transformador:

- qual é o enrolamento com derivações;
- o número de degraus e o valor de cada degrau (ou a faixa de derivação e número de degraus). Salvo se especificado em contrário, deve ser assumido que a faixa é simétrica em torno da derivação principal e que os degraus de derivação são iguais. Se por alguma razão o projeto necessitar de degraus diferentes, isto deve ser indicado na especificação técnica e pedido de compra;
- o tipo de regulação e, para regulações combinadas, o ponto de mudança (para derivação de tensão máxima, ver 6.2);
- deve-se impor um limite de corrente máxima (derivações à potência reduzida) e sobre quais derivações.

As alíneas c) e d) podem ser substituídas com vantagens por uma Tabela do mesmo tipo daquela utilizada para a placa de identificação para os valores nominais (ver exemplo no Anexo B).

As especificações destes dados podem ser realizadas de duas formas diferentes:

- por meio de uma especificação completa de dados feita desde o início pelo comprador; ou
- o comprador pode submeter um conjunto de casos de carga com valores de potências ativas e reativas (indicando claramente a direção do fluxo de potência) e as correspondentes tensões em carga.

Neste caso, deve-se indicar os valores extremos da relação de tensões a plena potência e à potência reduzida. A partir destas informações, o fabricante deve selecionar o enrolamento com derivações e especificar as grandezas nominais e grandezas de derivações em sua proposta.

## 6.5 Especificação da impedância de curto-circuito

Salvo especificado em contrário, a impedância de curto-circuito de um par de enrolamentos é referida à derivação principal (ver 3.7.1). Para os transformadores com um enrolamento de derivações com faixa de derivações excedendo  $\pm 5\%$ , os valores de impedância devem também ser fornecidos para as duas derivações extremas. Para tais transformadores, os três valores de impedância devem ser medidos durante o ensaio de impedância de curto-circuito (ver 11.4).

Quando os valores de impedância são dados para várias derivações, e particularmente quando os enrolamentos do par possuem valores de potências nominais diferentes, é recomendável definir os valores de impedância, em ohms por fase, referindo-se a um dos enrolamentos, em vez dos valores percentuais. Os valores percentuais podem gerar confusão devido a práticas diferentes utilizadas para escolha de valores de referência. Sempre que os valores forem fornecidos em porcentagem, é aconselhável informar os valores de referência de potência e tensão.

**NOTA** A seleção do valor de impedância pelo comprador está condicionada a exigências contraditórias: limitar a queda de tensão, ou limitar a sobrecorrente em condições de falta. Uma otimização econômica do projeto, levando-se em conta as perdas, determina uma certa faixa de valores de impedância. O funcionamento em paralelo com um transformador existente requer uma harmonização das impedâncias.

Se uma ordem de compra mencionar não apenas a impedância na derivação principal, mas também sua variação na faixa de regulação, isto representa restrições relativamente importantes para o projeto (posição dos enrolamentos uns em relação aos outros). Tal especificação detalhada não deve ser estabelecida sem uma razão válida.

Uma forma de especificar os valores de impedância de curto-circuito, que permite um certo grau de liberdade para o projeto, é indicar uma faixa aceitável entre os limites superior e inferior, para toda a faixa de derivações. Isto pode ser feito através da ajuda de um gráfico ou de uma Tabela.

Os limites devem ser suficientemente espaçados para permitir que as tolerâncias estabelecidas na Seção 10 possam ser aplicadas sobre um valor médio entre eles. Um exemplo é dado no Anexo C. O fabricante deve escolher e garantir os valores de impedância da derivação principal e das derivações extremas entre os valores limites. Os valores medidos podem diferir dos valores garantidos, dentro das tolerâncias da Seção 10, mas estes não devem superar os limites fixados, que são especificados sem tolerância.

## 6.6 Perdas em carga e elevação de temperatura

O comprador deve informar para quais derivações, além da principal, as perdas em carga devem ser garantidas pelo fabricante. Estas perdas em carga são referidas às correntes de derivação. Os limites de elevação de temperatura são válidos para todas as derivações, à potência, à tensão e à corrente de derivação correspondentes.

O ensaio de elevação de temperatura, se especificado, deve ser realizado em uma só derivação. Salvo especificado em contrário, deve ser na “derivação de máxima corrente” (que em geral é a derivação correspondente às maiores perdas em carga). As perdas totais para esta derivação correspondem à potência de ensaio para determinar a elevação de temperatura do óleo durante o ensaio de elevação de temperatura, e a corrente de derivação para esta derivação é a corrente de referência tomada para a determinação da elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o óleo. As informações a respeito das regras e dos ensaios do ponto de vista da elevação de temperatura de transformadores imersos em óleo encontram-se na ABNT NBR 5356-2.

Em princípio, o ensaio de tipo de elevação de temperatura deve demonstrar que o sistema de resfriamento permite dissipar as perdas totais máximas em qualquer derivação, e que a elevação de temperatura acima do ambiente de qualquer enrolamento, em qualquer derivação, não excede o valor máximo especificado.

Isto requer que seja selecionada, para o ensaio, a “derivação de máxima corrente”. Contudo, as perdas totais a serem injetadas para determinar a máxima elevação da temperatura do óleo devem corresponder ao valor máximo entre todas as derivações, mesmo se alguma outra derivação for escolhida para ensaio (ver também 5.2 da ABNT NBR 5356-2:2007).



## **7 Marcações dos terminais e símbolos de ligação e deslocamento angular para transformadores trifásicos**

### **7.1 Marcação dos enrolamentos e terminais**

#### **7.1.1 Enrolamentos**

Os terminais dos enrolamentos e respectivas ligações devem ser claramente identificados por meio de marcação constituída por algarismos e letras, a qual deve ser fielmente reproduzida no diagrama de ligações. Nos painéis de comutação de derivação, a marcação deve ser feita com caracteres gravados em baixo relevo e pintados para efeitos de contraste.

#### **7.1.2 Terminais**

Os terminais dos diversos enrolamentos devem ser marcados com as letras maiúsculas H, X, Y e Z. A letra H é reservada ao enrolamento de alta tensão (exceto se este for o de seis fases nos transformadores de três para seis fases). A seqüência das demais letras deve ser baseada na ordem decrescente das tensões nominais dos enrolamentos. No caso de igualdade de tensões nominais e potências nominais, as letras devem ser as mesmas, e a diferenciação deve ser feita usando-se, antes de cada letra, um número de ordem que designa cada enrolamento. Tais letras devem ser acompanhadas por números 0, 1, 2, 3 etc., para o primeiro deles indicar o terminal de neutros, e os outros, os terminais das diversas fases e derivações (ver exemplos na Figura 2).

No caso de igualdade de tensões nominais, mas não de potências nominais, a diferenciação deve ser feita usando-se letras diferentes para os enrolamentos, na ordem decrescente das potências destes. Os terminais correspondentes devem ter a mesma polaridade.

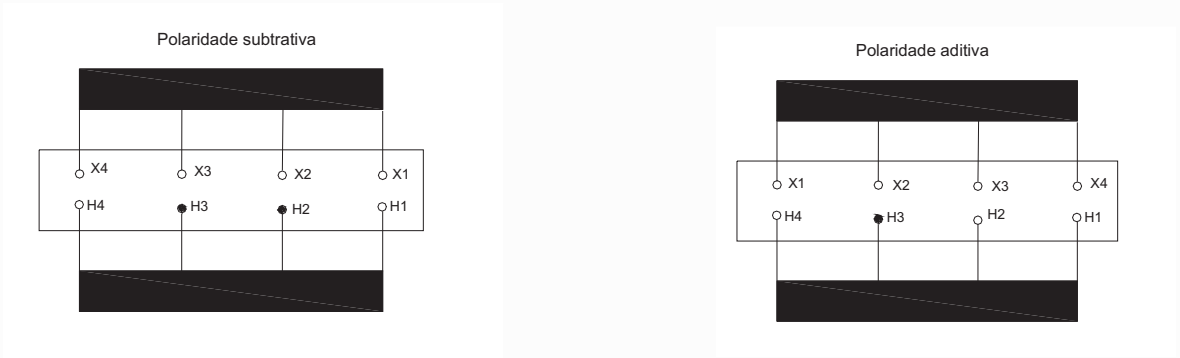


Figura 2-a – Enrolamentos H e X simples, com derivações – Transformador monofásico

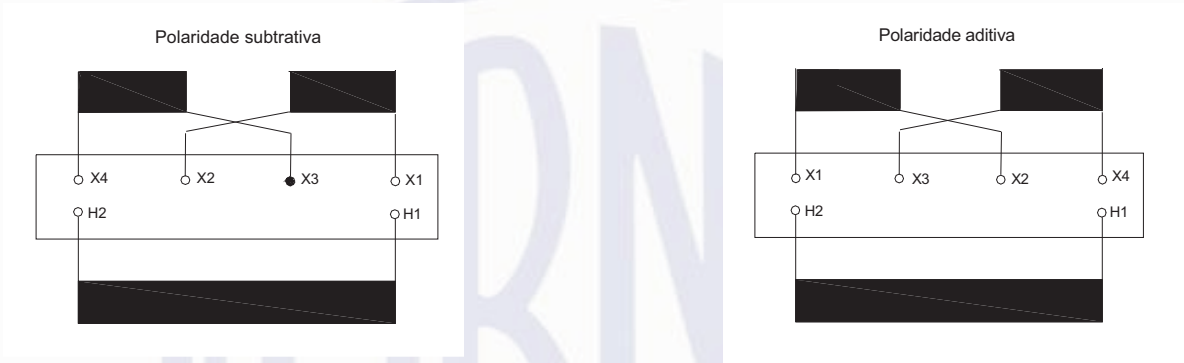


Figura 2-b – Enrolamentos X série-paralelo, sem derivações – Transformador monofásico

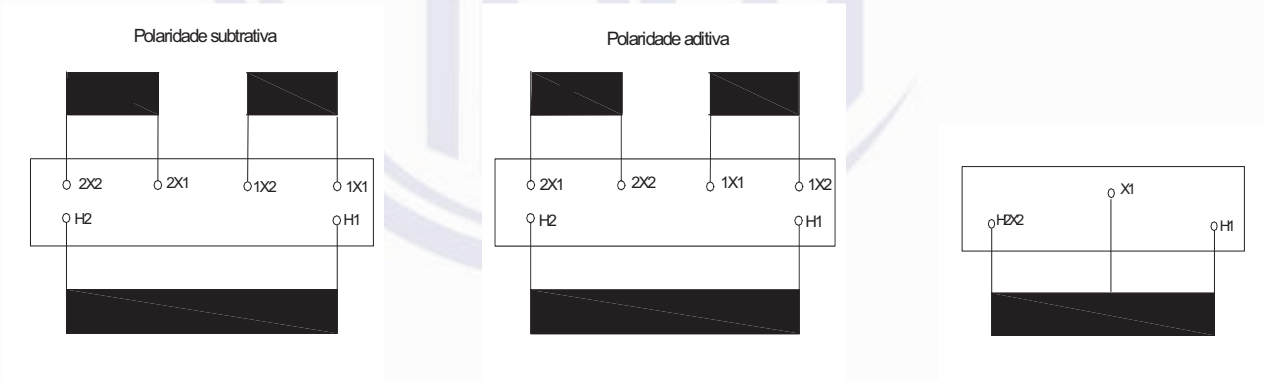


Figura 2-c – Transformador monofásico – Enrolamentos X independentes (não passíveis de ligação série-paralelo com tensões e potência iguais)

Figura 2-d – Autotransformador monofásico



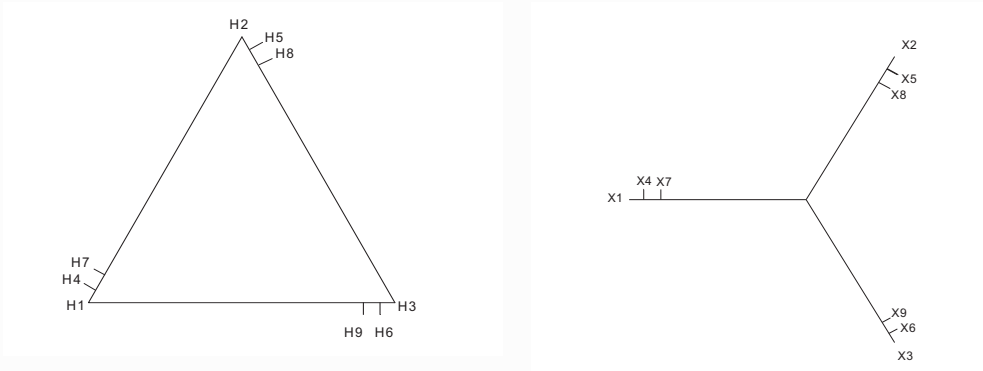


Figura 2-e – Transformadores trifásicos com derivações

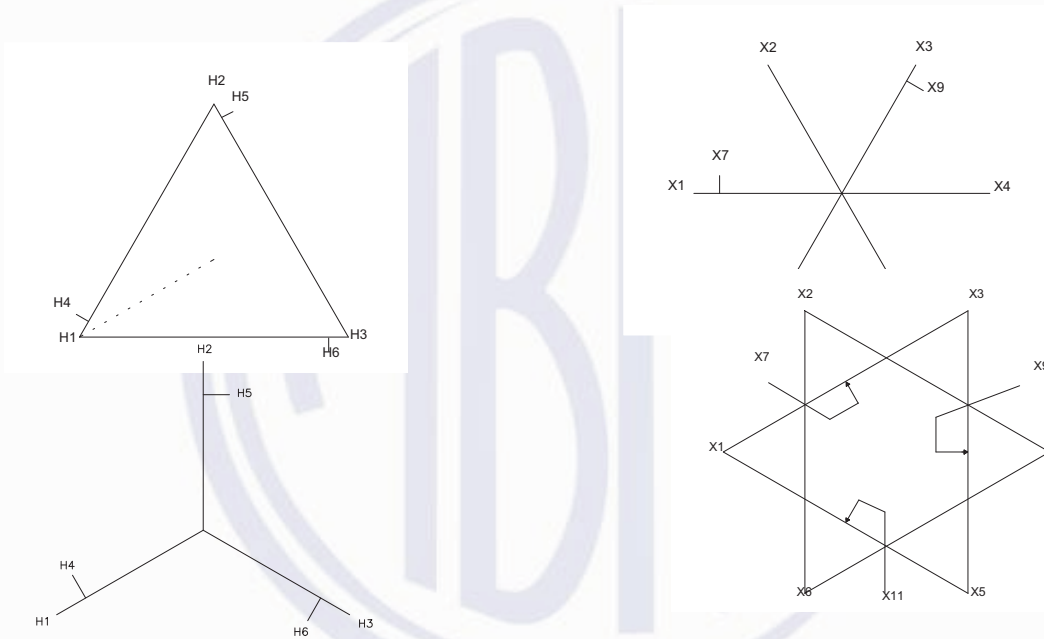


Figura 2-f – Transformadores hexafásicos com derivações

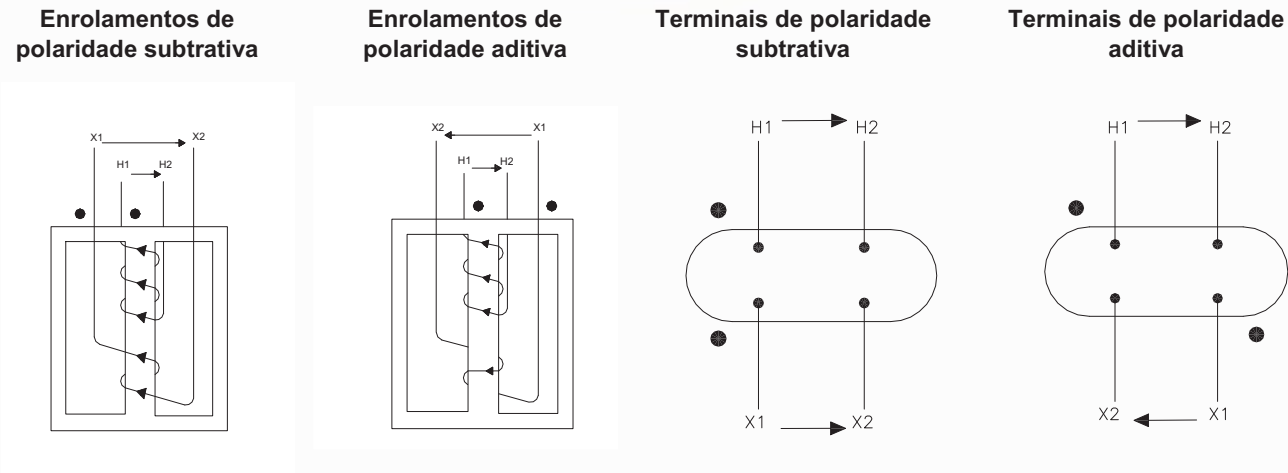


Figura 2-g – Enrolamento e terminais

Figura 2 — Marcação dos enrolamentos e terminais – Polaridade

### 7.1.3 Localização dos terminais H

O procedimento é o seguinte:

- e) o terminal H1 deve ficar localizado à direita do grupo de terminais de alta tensão, quando se olha o transformador do lado desta tensão. Os outros terminais H devem seguir a ordem numérica, da direita para a esquerda;
- f) quando o enrolamento de alta tensão, em transformadores monofásicos, possuir apenas um terminal acessível externamente, este é marcado com H1 e o outro terminal, aterrado internamente, é designado H2T;
- g) quando, em transformadores monofásicos, os terminais do enrolamento de alta tensão forem acessíveis externamente, e existirem duas buchas com diferentes tensões nominais, a de maior tensão nominal é marcada com H1 e deve ser localizada como o exposto na alínea a) anterior;
- h) para transformadores monofásicos de distribuição, os terminais devem ser localizados conforme previsto na ABNT NBR 5440.

### 7.1.4 Terminal de neutro

Todo terminal de neutro deve ser marcado com a letra correspondente ao enrolamento e seguida do número zero. O terminal de neutro H0, se existir, deve ser localizado no lado direito do terminal H1, quando se olha do lado desta tensão.

### 7.1.5 Localização dos terminais em transformadores monofásicos

Salvo especificação diferente, os terminais correspondentes de um transformador monofásico devem estar adjacentes, no caso de polaridade subtrativa, e opostos, no caso de polaridade aditiva. Ver Figura 2.

### 7.1.6 Localização dos terminais X

O terminal X1 deve ficar localizado à esquerda do grupo de terminais de baixa tensão, quando se olha o transformador do lado desta tensão. Os outros terminais X devem seguir a ordem numérica, da esquerda para a direita. O terminal de neutro - X0, se existir, deve ser localizado no lado esquerdo do terminal X1 quando se olha do lado desta tensão.

### 7.1.7 Localização dos terminais Y e Z

Os terminais Y e Z, se existirem devem ser numerados da mesma maneira que os terminais de baixa tensão.

## 7.2 Ligação dos enrolamentos de fase e indicação do deslocamento angular

A ligação em estrela, em triângulo ou em ziguezague de um conjunto de enrolamentos de fase de um transformador trifásico ou dos enrolamentos de mesma tensão de transformadores monofásicos associados num banco trifásico deve ser indicada pelas letras Y, D ou Z para os enrolamentos de alta tensão e y, d ou z para os enrolamentos de média e de baixa-tensão. Se o ponto neutro de um enrolamento em estrela ou de um enrolamento em ziguezague for acessível, as indicações devem ser, respectivamente, YN ou ZN e yn ou zn. Em autotransformadores, nos quais dois enrolamentos têm uma parte em comum, o enrolamento de tensão nominal mais baixa deste par é indicado com a letra "a"; por exemplo, um autotransformador ligado em estrela, com neutro acessível, é designado por Yna.

O deslocamento angular é indicado no mostrador de um relógio, cujo ponteiro grande (minutos) se acha parado em 12 e coincide com o fasor da tensão entre o ponto neutro (real ou imaginário) e um terminal de linha do enrolamento de alta tensão, e cujo ponteiro pequeno (horas) coincide com o fasor tensão entre o ponto neutro (real ou imaginário) e o terminal de linha correspondente do terminal considerado.

O fasor do enrolamento de alta tensão é tomado como origem. A Figura 3 apresenta exemplos de diagramas fasoriais que mostram o uso da indicação horária de fasores. As marcações dos terminais H1, H2, H3 e X1, X2, X3 são utilizadas nesta Figura apenas para fins de ilustração.

Em transformadores de mais de dois enrolamentos, o fasor do enrolamento de alta tensão permanece como fasor de referência, sendo o símbolo destes enrolamentos indicado em primeiro lugar. Os demais símbolos seguem em seqüência decrescente das tensões nominais dos outros enrolamentos. No caso de autotransformadores, nos quais dois enrolamentos têm uma parte em comum, a letra "a", que corresponde ao enrolamento de mais baixa tensão do par, deve ser escrita depois da letra correspondente ao enrolamento de mais elevada tensão nominal do par; por exemplo, YNa0d11 (o par de enrolamentos com uma parte comum inclui o enrolamento de alta-tensão) ou Dyn11a11 (o par de enrolamentos com uma parte comum não inclui o enrolamento de alta tensão).

NOTA 1 Na Figura 4 são mostradas designações detalhadas de algumas ligações usuais de transformadores trifásicos e o correspondente deslocamento angular, não restringindo o uso de outras ligações.

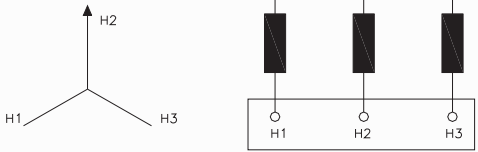
NOTA 2 Na Figura 5 são mostradas designações detalhadas de algumas ligações adicionais de transformadores trifásicos e o correspondente deslocamento angular.

NOTA 3 Em autotransformadores observa-se que somente os deslocamentos angulares com indicações horárias 0, 4 e 8 são adequados para autotransformadores ligados em estrela. A Figura 6 está limitada ao símbolo de ligação Ya0.

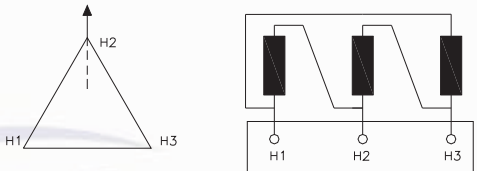
NOTA 4 A Figura 7 mostra o diagrama do banco trifásico formado por três transformadores monofásicos a título de exemplo. As duas extremidades dos enrolamentos de cada transformador monofásico são acessíveis por ligação aos respectivos terminais marcados.

NOTA 5 Na prática, o uso de letras maiúsculas somente ou de letras minúsculas somente não dá margem à interpretação errônea, devido particularmente às disposições precedentes.

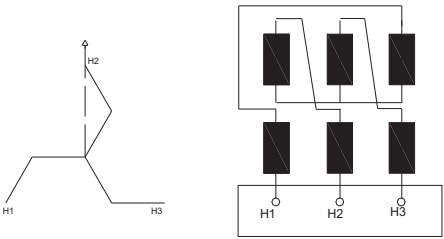
Estrela (Y)



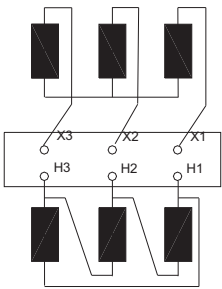
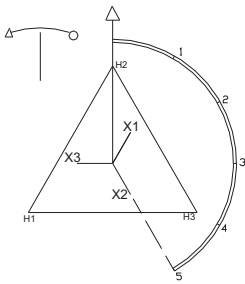
Triângulo (D)



Zigzague (Z)

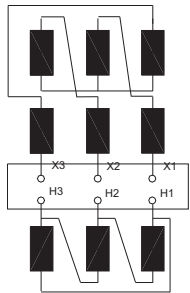
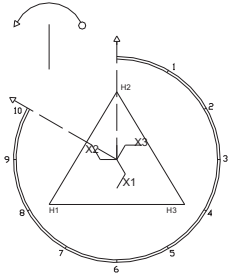


Sentido de rotação dos fasores



Símbolo de ligação Dy5

Sentido de rotação dos fasores



Símbolo de ligação Dz10

Figura 3 — Diagrama ilustrado dos símbolos de ligação

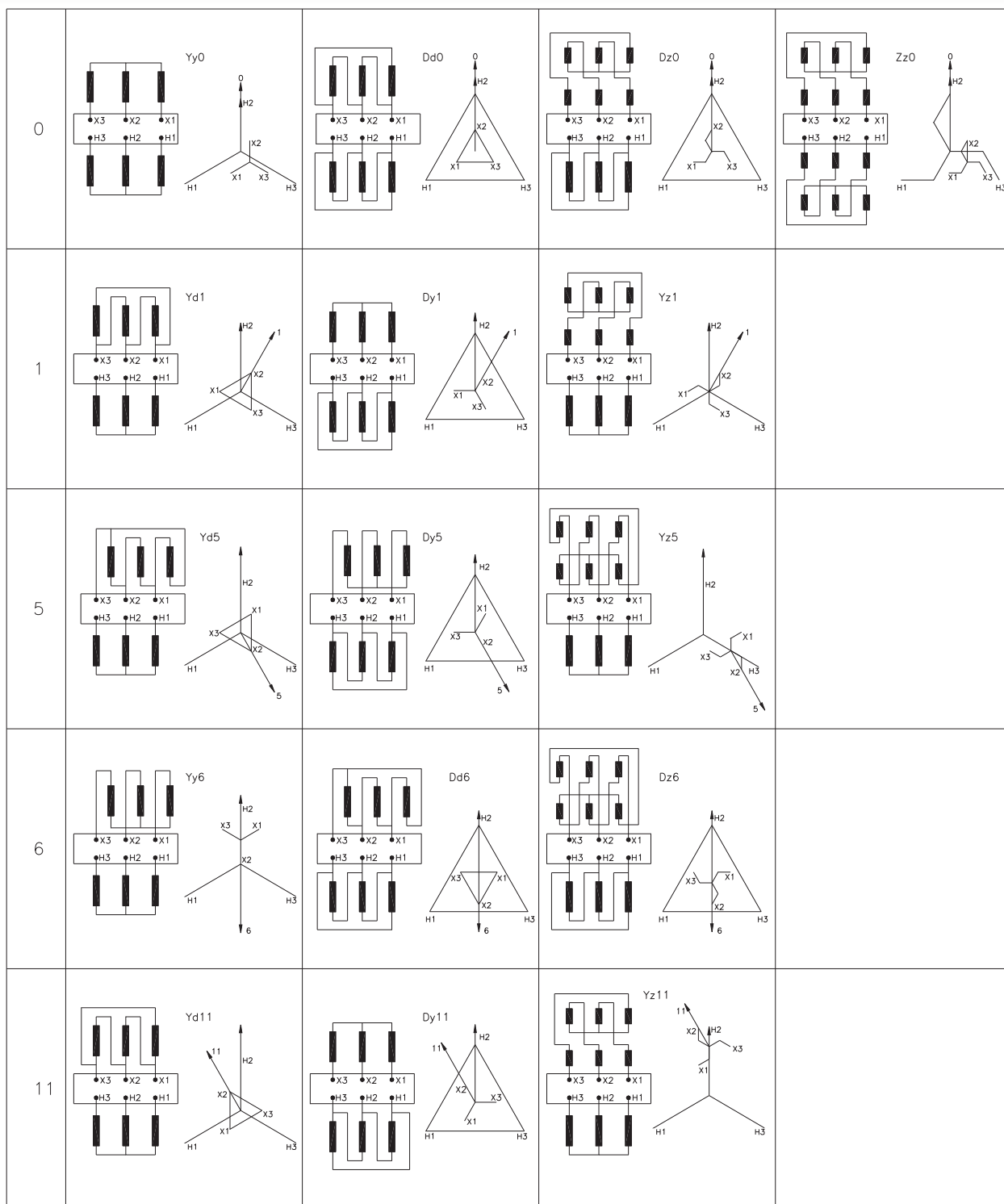
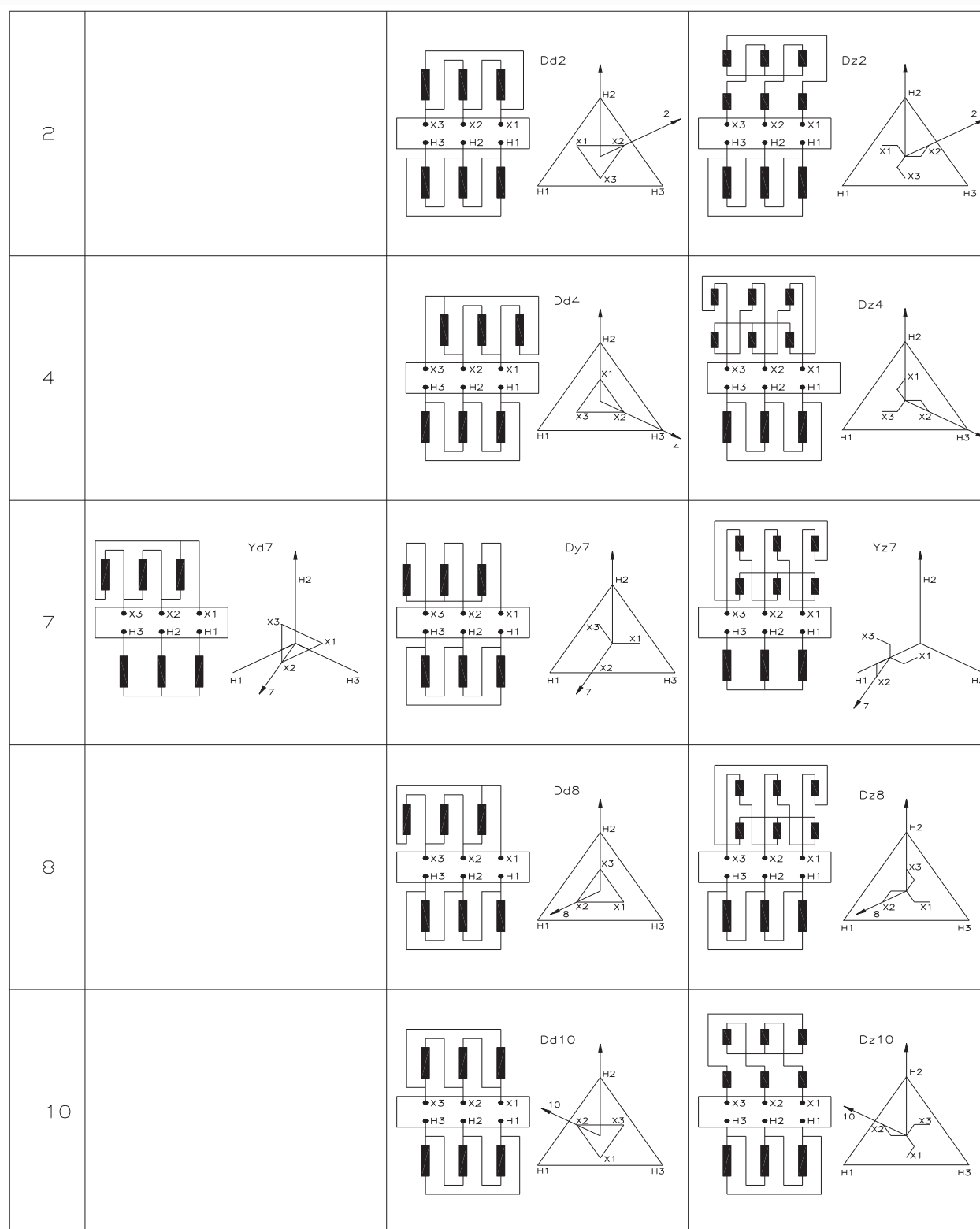
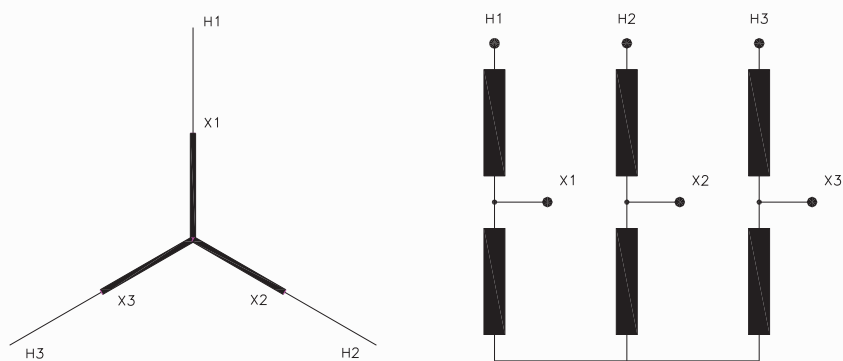


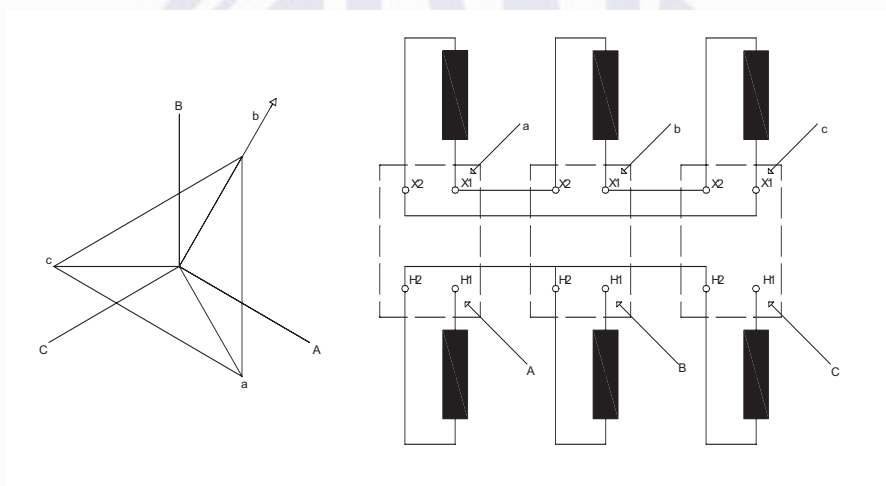
Figura 4 — Ligações usuais – Exemplos de símbolos de ligação, marcação de terminais e diagramas fasoriais de tensão de transformadores trifásicos



**Figura 5 — Ligações adicionais – Exemplos de símbolos de ligação, marcação de terminais e diagramas fasoriais de tensão de transformadores trifásicos**



**Figura 6 — Designação das ligações de transformadores trifásicos por meio de símbolos de ligação – Autotransformador Ya0**



**Figura 7 — Exemplo de três transformadores monofásicos ligados para formarem um banco trifásico (símbolo de ligação Yd1)**

**EXEMPLO 1** Um transformador de dois enrolamentos, como segue:

- enrolamento em triângulo, com tensão nominal de 138 kV;
- enrolamento em estrela, com neutro acessível e tensão nominal de 13,8 kV.

A tensão do enrolamento ligado em estrela está adiantada em 30° sobre a tensão do outro enrolamento (indicação horária 11). O símbolo de ligação é Dyn11.

**EXEMPLO 2** Um transformador de três enrolamentos, como segue:

- enrolamento em estrela, com neutro acessível e tensão nominal de 138 kV;
- enrolamento em estrela, com neutro acessível e tensão nominal de 34,5 kV;
- enrolamento em triângulo, com tensão nominal de 13,8 kV.

As tensões dos dois enrolamentos ligados em estrela estão em fase (indicação horária 0) e a tensão do enrolamento ligado em triângulo está adiantada em 30° sobre as outras tensões (indicação horária 11). O símbolo de ligação é YNyn0d11.



EXEMPLO 3 Um transformador de três enrolamentos, como segue:

- enrolamento em estrela, com neutro acessível e tensão nominal de 525 kV;
- enrolamento em estrela, com neutro acessível e tensão nominal de 345 kV;
- enrolamento em zigzag, com neutro acessível e tensão nominal de 13,8 kV.

As tensões dos dois enrolamentos ligados em estrela estão em fase (indicação horária 0) e a tensão do enrolamento ligado em zigzag está atrasada em 30° sobre as outras tensões (indicação horária 1). O símbolo de ligação é YNyn0zn1.

O deslocamento angular, nos transformadores trifásicos ligados em triângulo-triângulo, estrela-estrela ou em triângulo-zigzag, deve ser de 0°, exceto em casos especiais (ver Figura 4, ligações Dd0, Yy0 e Dz0, respectivamente).

O deslocamento angular, nos transformadores trifásicos ligados em triângulo-estrela, em estrela-triângulo ou em estrela-zigzag, deve ser de 30°, com as fases de baixa tensão atrasadas com relação às correspondentes de alta tensão (ver Figura 4, ligações Dy1, Yd1 e Yz1, respectivamente), exceto em casos especiais.

O diagrama de ligações deve ser constituído de um esquema dos enrolamentos, mostrando as ligações permanentes, bem como todas as derivações e terminais, com os números ou letras indicativos (ver Figura 8). Deve conter também uma tabela mostrando separadamente as ligações dos diversos enrolamentos, com a disposição e identificação de todas as buchas, bem como as ligações no painel ou a posição do comutador para a tensão nominal e as tensões de derivação. Devem constar no diagrama as tensões expressas em volts, não sendo, porém, necessário escrever esta unidade.

## 8 Placas de identificação

O transformador deve ser provido de uma placa de identificação resistente às intempéries, fixada em posição visível e mostrando as informações indicadas abaixo. As inscrições devem ser marcadas de forma indelével.

### 8.1 Informações a serem fornecidas em todos os casos

- a) tipo de transformador (por exemplo, transformador, autotransformador, transformador de reforço etc.);
- b) número desta Norma;
- c) nome do fabricante;
- d) número de série do fabricante;
- e) ano de fabricação;
- f) número de fases;
- g) potência nominal (em kVA ou em MVA) (para os transformadores com mais de dois enrolamentos, é conveniente fornecer a potência nominal de cada um deles. Deve-se indicar igualmente as combinações de cargas, salvo se a potência nominal de um dos enrolamentos for igual à soma das potências nominais dos outros enrolamentos);
- h) frequência nominal;
- i) tensões nominais (em V ou kV) e faixa de derivações;
- j) correntes nominais (em A ou kA);
- k) diagrama e símbolo de ligação;
- l) impedância de curto-circuito, valor medido em percentagem. Para os transformadores de mais de dois enrolamentos, fornecer as impedâncias correspondentes às diferentes combinações de dois enrolamentos, com os valores de potência de referência respectivos. Para os transformadores com um enrolamento com derivações, ver também 6.5 e 8.2 alínea b);

- m) sistema de resfriamento (se o transformador tiver vários estágios de resfriamentos, as potências correspondentes podem ser expressas em percentagem da potência nominal, por exemplo ONAN/ONAF 70/100 %);
- n) massa total;
- o) massa de óleo isolante;
- p) limite de elevação de temperatura;
- q) tipo de óleo isolante;
- r) massa da parte ativa;
- s) número do manual de instruções;
- t) vazão, para transformadores resfriados à água;
- u) corrente de curto-circuito suportável, para transformadores de potências nominais maiores que 500 kVA;
- v) polaridade, no caso de transformadores monofásicos.


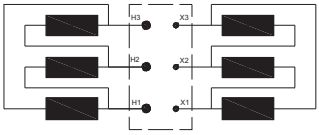
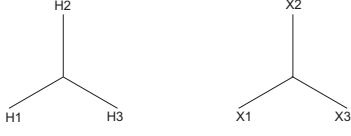
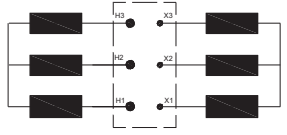

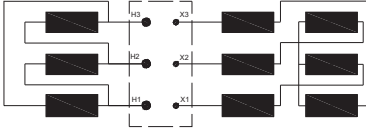
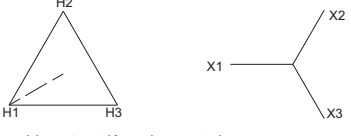
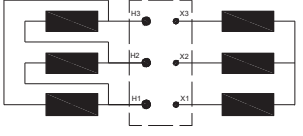
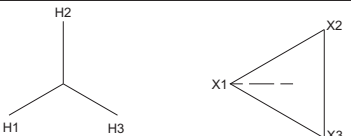
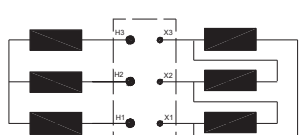
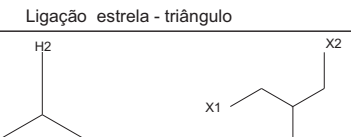
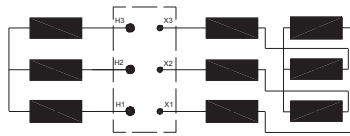
	Deslocamento angular	Diagrama de ligações
Deslocamento angular 0°	 <p>Ligação triângulo - triângulo</p>	
	 <p>Ligação estrela - estrela</p>	
	 <p>Ligação triângulo - zigzague</p>	
Deslocamento angular 30°	 <p>Ligação triângulo - estrela</p>	
	 <p>Ligação estrela - triângulo</p>	
	 <p>Ligação estrela - zigzague</p>	

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

## 8.2 Informações suplementares a serem fornecidas quando aplicável

- a) para os transformadores com um ou mais enrolamentos com tensão máxima admissível do equipamento,  $U_m$ , maior ou igual a 3,6 kV: notação abreviada dos níveis de isolamento (tensões suportáveis), como descrito na Seção 5 da ABNT NBR 5356-3:2007;

para transformadores com um enrolamento com derivações, as informações relativas as derivações são as seguintes:

- para transformadores com faixa de derivações que não excedam  $\pm 5\%$ : as tensões de derivação para todas as derivações do enrolamento com derivações. Isto se aplica em particular aos transformadores de distribuição;
- para os transformadores com faixa de derivação que excedem  $\pm 5\%$ : uma tabela mencionando a tensão, a corrente e a potência de derivação para todas as derivações. Adicionalmente, as impedâncias de curto-circuito devem ser dadas, pelo menos, para a derivação principal e derivações extremas, de preferência em ohms por fase referido a um enrolamento específico;

a elevação de temperatura do topo do óleo e dos enrolamentos (se estes não forem os valores normais). Quando um transformador é especificado para instalação com altitude elevada (acima de 1 000 m), isto deve ser indicado junto com as informações ou do valor reduzido de elevação de temperatura admissível nas condições ambiente normais, ou da carga reduzida que resultará de uma elevação de temperatura normal à altitude elevada (transformador normalizado com capacidade normal de resfriamento);

natureza do líquido isolante, se não se tratar de óleo mineral;

esquema de ligação (no caso onde os símbolos de ligação não forneçam indicação completa no que concerne às ligações interiores). Se as ligações puderem ser alteradas no interior do transformador, é necessário indicar em uma placa separada ou duplicar as placas de identificação. Deve-se indicar quais são as ligações feitas no campo;

massa para transporte sem óleo (para transformadores cuja massa total ultrapassa 5 t). A massa para transporte com óleo isolante deve ser indicada quando especificado;

massa a elevar para retirada do núcleo (para transformadores cuja massa total ultrapassa 5 t);

resistência a vácuo do tanque, radiadores e conservador;

quando houver transformadores de corrente instalados, a sua localização deve ser indicada no diagrama de ligação, com as respectivas polaridades. Devem ser indicadas também as relações de transformação, classes de exatidão e identificação dos seus terminais secundários.

Adicionalmente à placa de identificação principal com as informações listadas acima, o transformador deve também possuir placas com identificações e características de equipamentos auxiliares de acordo com normas destes componentes (buchas, comutadores, equipamento de resfriamento especial).

## 9 Requisitos gerais

### 9.1 Dimensionamento da conexão de neutro

O condutor neutro e o terminal de neutro do transformador (por exemplo, transformadores de distribuição), destinados a alimentar uma carga localizada entre fase e neutro, devem ser dimensionados para a corrente de carga adequada e a corrente de falta à terra.

O condutor neutro e o terminal de neutro dos transformadores não previstos para alimentar uma carga localizada entre fase e neutro devem ser dimensionados para a corrente de falta à terra.

## 9.2 Sistema de preservação de óleo

Para transformadores imersos em óleo, o tipo de preservação de óleo deve ser especificado. Distinguem-se os tipos seguintes:

- sistema de respiração livre ou conservador, tal que a comunicação entre o ar ambiente e o ar em contato com o óleo, no tanque ou em um vaso de expansão separado (conservador), permanece livre. Um respirador com secador de ar é geralmente instalado na ligação com a atmosfera;
- sistema de preservação de óleo tipo diafragma onde existe um volume de expansão de ar sobre o óleo, à pressão atmosférica, mas isolado do óleo por uma bolsa flexível ou uma membrana;
- sistema a gás inerte sob pressão onde o volume de expansão acima do óleo é completado por gás inerte seco com leve sobrepressão e ligado a uma fonte de pressão controlada, ou mesmo uma membrana elástica (bexiga);
- sistema selado com colchão de gás, no qual um volume de gás localizado acima da superfície do óleo, em um tanque rígido, absorve a expansão de óleo, por variação de pressão;
- sistema selado de enchimento integral, no qual a expansão de óleo é absorvida por um movimento elástico do tanque, geralmente de construção corrugada.

## 9.3 Rejeição de carga em transformadores elevadores

Transformadores destinados a conexão direta a geradores podem estar sujeitos a condições de rejeição de carga e devem suportar 1,4 vez sua tensão nominal por 5 s nos terminais do transformador aos quais o gerador é conectado.

## 9.4 Características construtivas

### 9.4.1 Características do líquido isolante

O líquido isolante a ser utilizado e sua especificação devem ser acordados entre fabricante e comprador.

#### 9.4.1.1 Características do óleo mineral isolante, antes do contato com o equipamento

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) classifica o óleo mineral isolante para transformadores e equipamentos de manobra em dois tipos: A e B. Seus requisitos são especificados por Regulamentos Técnicos da ANP vigentes, aplicáveis a cada tipo de óleo mineral isolante. As características e aplicação de cada tipo de óleo estão sujeitas a modificações em resoluções ou regulamentos técnicos adotados pela ANP.

#### 9.4.1.2 Características do óleo mineral isolante, após o contato com o equipamento

O óleo mineral isolante, após contato com o equipamento, deve apresentar as características indicadas na Tabela 5, tanto no caso do óleo parafínico, quanto no do óleo naftênico.

### 9.4.2 Tanque do transformador e respectiva tampa

O tanque do transformador e a respectiva tampa devem ser de chapa de aço, conforme ABNT NBR 6650 e ABNT NBR 11888, ou ABNT NBR 6648 e ABNT NBR 11889, o que for aplicável, de modo a suportarem no mínimo vácuo pleno e pressão especificados nas Tabelas 4 e 6.

### 9.4.3 Radiadores

Nos radiadores, devem ser utilizadas chapas conforme a ABNT NBR 5915, com no mínimo 1,2 mm de espessura (chapa nº18, bitola USG), ou tubos conforme a ABNT NBR 5590, com no mínimo 1,5 mm de espessura (chapa nº 16, bitola USG), de modo a suportarem no mínimo vácuo pleno e pressão especificados nas Tabelas 6 e 7. Alternativas quanto às características construtivas, materiais, espessuras, suportabilidade a vácuo e pressão podem ser utilizadas quando acordadas entre fabricante e comprador.

### 9.4.4 Acabamento do tanque e dos radiadores

A preparação das superfícies internas e externas dos transformadores e a respectiva proteção contra corrosão devem ser executadas de acordo com a ABNT NBR 11388. A cor da pintura de acabamento externo deve ser cinza-claro Munsell N6.5. Para transformadores de potência nominal superior a 5 000 kVA, a pintura de acabamento interno deve ser branca, referência Munsell N9.5.

### 9.4.5 Juntas de vedação

As juntas de vedação devem ser compatíveis quimicamente com o líquido isolante, ter classe de temperatura compatível com a classe do material isolante do transformador e ser resistentes à ação da umidade e dos raios solares.

### 9.4.6 Aterramento do núcleo

O núcleo deve ser aterrado em um único ponto. Para transformadores com potência nominal acima de 20 MVA, essa única ligação deve ser de fácil desconexão e acessível externamente, sem a necessidade de baixar o nível do óleo do tanque do transformador.

### 9.4.7 Suportabilidade a vácuo

O tanque, os radiadores e os demais acessórios, exceto o comutador, de transformadores imersos em líquido isolante com potência igual ou superior a 750 kVA devem suportar vácuo pleno.

### 9.4.8 Comutador de derivações em carga

O comutador de derivações em carga, salvo especificação diferente do comprador, deve possuir as características indicadas a seguir.

#### 9.4.8.1 Acionamento motorizado do comutador de derivações em carga

O acionamento motorizado do comutador de derivações em carga deve ser instalado de forma que seja facilmente acessível pelo operador e deve conter os requisitos abaixo:

- a) chave seletora para comando local ou remoto;
- b) dispositivo para comando “elevar” ou “diminuir” a tensão, no mecanismo do acionamento;
- c) contadores para reverter o sentido de rotação do motor;
- d) contatos fim de curso para posições-limite;
- e) contato de bloqueio para operação manual (introdução de manivela);
- f) dispositivo para comando passo a passo;
- g) proteção termomagnética para o motor;



- h) circuito de aquecimento e iluminação;
- i) dispositivo para indicação remota de posições;
- j) indicador local de posições;
- k) contador de operações;
- l) manivela para operação manual;
- m) dispositivo para controle de paralelismo;
- n) grau de proteção do alojamento IP54, conforme ABNT NBR IEC 60529;
- o) fundo removível para entrada de cabos do usuário;
- p) meios para utilização de cadeado na porta;
- q) contatos para sinalização remota de motor em marcha-disjuntor desarmado;
- r) meios que prevejam bloqueio ou sinalização de seqüência incorreta das fases da alimentação do comutador;
- s) dispositivo mecânico que atue no caso de falha das chaves elétricas de fim de curso e que não cause deformações em qualquer peça do acionamento (exceto partes propositadamente enfraquecidas e de fácil reposição).

#### 9.4.8.2 Comando automático do comutador de derivações em carga

O comando automático do comutador de derivações em carga é feito através do relé regulador de tensão, que deve possuir os seguintes requisitos básicos:

- a) compensador de queda na linha;
- b) bloqueio por subtensão ajustável entre 70 % e 90 % da tensão de referência;
- c) temporização da resposta do relé: linear e inversa, faixa mínima ajustável entre 15 s e 120 s;
- d) insensibilidade: faixa mínima ajustável entre  $\pm 0,6$  % e  $\pm 3$  % da tensão de referência;
- e) tensão de referência: ajustável externamente pelo menos de 105 V a 120 V;
- f) classe de precisão mínima de 1 %;
- g) terminais acessíveis para medição da tensão secundária regulada.

#### 9.4.8.3 Comutador de derivações em carga em unidades monofásicas

Caso seja instalado em unidade monofásica formando um banco de transformadores, o comutador deve ser provido de dispositivo de controle que assegure a atuação simultânea nas três fases.

### 9.5 Acessórios

Os transformadores imersos em óleo, salvo exigência em contrário, devem possuir os acessórios constantes na Tabela 1.



### 9.5.1 Indicador externo de nível de óleo

O indicador deve ser colocado em local visível no transformador, sempre que possível no lado de baixa tensão. Deve ter referência para os níveis de óleo mínimo, máximo e a 25 °C, quando utilizado indicador magnético. No caso de utilização de indicador do tipo visor, os níveis de óleo mínimo e a 25 °C devem ser indicados. Para transformadores com potência nominal igual ou superior a 1 000 kVA, deve ter pelo menos um contato ajustado para operar quando o óleo atingir seu nível mínimo.

Transformadores desprovidos de indicador externo de nível de óleo, de acordo com a Tabela 1, devem ter uma linha ou outra indicação bem marcada no interior do tanque, estabelecendo o nível do óleo, quando na temperatura de 25 °C.

### 9.5.2 Indicador de temperatura do enrolamento

Deve constar de um dispositivo indicador de temperatura, com contatos, para operação independente para controle e proteção, ajustáveis pelo menos na faixa de 55 °C a 120 °C.

### 9.5.3 Indicador de temperatura do óleo

Deve ser graduado de 0 °C a 120 °C e possuir dispositivo indicador de temperatura máxima. Deve ter no mínimo dois contatos ajustáveis, na faixa de pelo menos 55 °C a 110 °C.

### 9.5.4 Provisão para instalação de termômetro para óleo

Consiste em um alojamento estanque, adequado para a instalação de um termômetro, colocado em posição que forneça a temperatura mais elevada do óleo.

### 9.5.5 Dispositivo para alívio de pressão

Deve operar de maneira que o valor da sobrepressão não ultrapasse o valor máximo admissível, com a eventual descarga do óleo, e ser provido de dispositivo direcionador do óleo para fora do tanque do transformador e no sentido contrário à disposição dos acessórios que possam exigir ação do operador. Quando for utilizado tubo de explosão com diafragma fixo na base, deve haver indicador externo de óleo para mostrar quando há ruptura do diafragma.

### 9.5.6 Relé detector de gás tipo Buchholz ou equivalente

Deve dispor de:

- a) contato que atua por volume de gás acumulado (cm<sup>3</sup>);  
janela graduada para indicação do volume de gás acumulado;
- b) contato que atua por velocidade mínima de óleo (m/s);
- c) dispositivos adequados, na parte superior, para retirada de amostra de gases, aplicação de analisador e ensaio de relé;
- d) bujão de drenagem na parte inferior;
- e) válvulas para reter o óleo antes e depois do relé Buchholz.

### 9.5.7 Caixa com blocos de terminais para ligação dos cabos de controle

A caixa deve ser colocada em posição acessível e, sempre que possível, no lado da baixa tensão, e ser à prova de intempérie, grau de proteção IP54, conforme a ABNT NBR IEC 60529.

### 9.5.8 Válvula de drenagem de óleo

A válvula deve ser colocada na parte inferior da parede do tanque. Todas as válvulas de drenagem do óleo devem ser providas de bujão.

Tabela 1 — Acessórios para transformadores

Máxima tensão operativa ( $U_m$ )		Potências nominais kVA						
		$U_m \leq 36,2 \text{ kV}$				$U_m \geq 72,5 \text{ kV}$		
	Acessórios	Transformador de distribuição aérea	$S_n \leq 1\,000$	$S_n < 5\,000$	$S_n \geq 5\,000$	$S_n < 2\,500$	$S_n \geq 2\,500$	$S_n \geq 5\,000$
		$S_n \leq 300$	$S_n > 300$	$S_n > 1\,000$			$S_n < 5\,000$	
9.5.1	Indicador externo de nível do óleo		*	*	*	*	*	*
9.5.2	Indicador de temperatura do enrolamento				*			*
9.5.3	Indicador de temperatura do óleo		z	z	*	*	*	*
9.5.4	Provisão para instalação de termômetro para óleo		*	*	*	*	*	*
9.5.5	Dispositivo para alívio de pressão		z	*	*	*	*	*
9.5.6	Relé detector de gás tipo Buchholz			z	*		*	*
9.5.7	Caixa com blocos de terminais para ligação dos cabos de controle			*	*	*	*	*
9.5.8	Válvula de drenagem de óleo		*	*	*	*	*	*
9.5.9	Meios de ligação para filtro			*	*	*	*	*
9.5.10	Dispositivo para retirada de amostra de óleo		*	*	*	*	*	*
9.5.11	Conservador de óleo (em transformadores não selados)			*	*	*	*	*
9.5.12	Válvulas para retenção do óleo dos radiadores ou trocadores de calor			$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$
9.5.13	Meios de aterramento do tanque	*	*	*	*	*	*	*
9.5.14	Meios para suspensão da parte ativa do transformador completamente montado, das tampas, do conservador de óleo e dos radiadores	*	*	*	*	*	*	*
9.5.15	Meios para locomoção		*	*	*	*	*	*
9.5.16	Apoios para macacos		z	*	*	*	*	*
9.5.17	Abertura de visita				o			o
9.5.18	Abertura de inspeção	+	+	*	*	*	*	*
9.5.19	Comutador de derivações sem tensão	z	z	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$
	Respirador com secador de ar (quando houver conservador)			*	*	*	*	*
	Provisão para colocação do relé detector de gás tipo Buchholtz ou equivalente (em transformadores não selados)			*		*		
	Dispositivo de alarme quando houver interrupção na circulação de água de resfriamento (quando houver)				*			*
	Indicadores de circulação do óleo (no caso de circulação forçada deste)							*
	Suporte para fixação dos dispositivos de suspensão de transformador para montagem em postes	*						

Tabela 1 (conclusão)

⊖	Dispensável quando for especificado comutador em carga.
*	Obrigatório.
+	Somente quando houver comutador de derivações.
Z	Somente quando o comprador especificar.
O	Somente para transformadores com potência acima de 20 MVA ou para transformadores com comutação em carga.
Δ	Somente quando houver radiadores destacáveis para transporte.
NOTA Todas as aberturas na tampa, inclusive as das buchas, devem ser providas de ressalto construídos de maneira a evitar a acumulação e/ou a penetração de água.	

### 9.5.9 Meios de ligação para filtro

A ligação deve ser feita por meio de uma válvula, provida de bujão, montada na parte superior da parede do tanque ou na tampa.

### 9.5.10 Dispositivo para retirada de amostra de óleo

O dispositivo deve ser colocado na parte inferior do tanque.

### 9.5.11 Conservador do óleo (em transformadores não selados)

**9.5.11.1** O conservador do óleo do transformador deve ser provido de respirador com secador de ar e de um dispositivo para drenagem do óleo.

**9.5.11.2** O conservador de óleo do comutador de derivações em carga, se aplicável, deve ter seu óleo independente do óleo do transformador. Deve ser provido de respirador com secador de ar, indicador externo de nível de óleo e dispositivo para drenagem do óleo.

### 9.5.12 Válvulas para retenção do óleo dos radiadores ou trocador de calor

Os transformadores imersos em óleo, providos de radiadores ou trocadores de calor destacáveis, devem possuir válvulas que impeçam o escoamento do óleo do tanque, quando da sua remoção total ou parcial. Estas válvulas devem possuir indicação das posições aberta e fechada.

### 9.5.13 Meios de aterramento do tanque

Os transformadores de potência nominal igual ou inferior a 1 000 kVA devem ter, na parte exterior do tanque, sempre que possível perto do fundo, um dispositivo de material não-ferroso ou inoxidável que permita fácil ligação à terra. Os transformadores de potência nominal superior a 1 000 kVA devem ter dois dispositivos de aterramento, localizados diagonalmente opostos e destinados a aterramento, sendo que apenas um deles deve ser utilizado.

### 9.5.14 Meios para suspensão do transformador completamente montado da parte ativa, das tampas, do conservador de óleo e dos radiadores

Os transformadores devem dispor de meios (alças, olhais, ganchos etc.) para seu levantamento completamente montado, inclusive com óleo; devem, também, dispor de meios para o levantamento de sua parte ativa, do conservador de óleo e dos radiadores. Toda tampa cuja massa seja superior a 15 kg deve dispor de meios para seu levantamento.

### 9.5.15 Meios para locomoção

Os transformadores devem dispor de meios para locomoção, como base própria para arrastamento ou rodas orientáveis.

Os transformadores devem possuir meios de fixação de cabos e correntes, que permitam movimentação sobre um plano, segundo duas direções ortogonais.

#### 9.5.16 Apoios para macacos

Podem ser feitos sob a forma de ressaltos ou de alojamentos, devendo ser adequados tanto para a colocação como para permitir o acionamento de macacos.

#### 9.5.17 Abertura de visita

As dimensões de abertura de visita devem ser no mínimo de 350 mm x 500 mm ou de diâmetro mínimo de 400 mm. Sempre que possível, deve ser localizada na tampa do transformador e, no caso de transformador dotado de comutador de derivações em carga, próximo do comutador.

#### 9.5.18 Abertura de inspeção

Os transformadores devem ter, quando necessário, uma ou mais tampas auxiliares na tampa principal, para permitir o desligamento dos terminais internos para as buchas, mudanças de derivações e inspeção.

#### 9.5.19 Comutador de derivações sem tensão

O comutador de derivações, quando manobrável externamente, deve ter seu dispositivo de acionamento colocado, preferencialmente, próximo à placa de identificação e em posição acessível ao operador. O comutador de derivações deve ter indicação de posição local visível externamente e dispor de meios que permitam o seu travamento em qualquer posição, com o emprego de cadeado.

### 10 Tolerâncias

As tolerâncias indicadas na Tabela 2 devem ser aplicadas a todo valor especificado e/ou garantido para as características do transformador, de acordo com esta Norma. Para características especificadas como valores máximos ou mínimos admissíveis, não há tolerâncias a considerar.

Não é sempre possível, particularmente para transformadores de grande potência com mais de dois enrolamentos com relativamente baixa tensão nominal, ajustar com grande precisão as relações de espiras correspondentes às relações de transformação nominais especificadas. Existem também outras grandezas que não podem ser definidas com exatidão no momento da proposta ou que são sujeitas às incertezas de fabricação e a erros de medida.

Por isso, as tolerâncias são necessárias para certos valores garantidos.

A Tabela 2 fornece as tolerâncias aplicáveis a algumas grandezas, nominais ou não, quando garantidas pelo fabricante. Onde a tolerância em um sentido for omitida, não existe restrição para este valor neste sentido.

Um transformador é considerado como satisfazendo esta Norma quando as grandezas sujeitas às tolerâncias não estão fora das faixas dadas na Tabela 2.

Tabela 2 — Tolerâncias

Item	Características especificadas	Tolerância
01	<p>Impedância de curto-circuito</p> <p>a) Tolerância no valor medido em relação ao valor declarado pelo fabricante</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— transformadores de dois enrolamentos <math>\pm 7,5 \%</math></li> <li>— transformadores de mais de dois enrolamentos <math>\pm 10 \%</math></li> <li>— transformadores com enrolamentos em zig-zague <math>\pm 10 \%</math></li> <li>— autotransformadores <math>\pm 10 \%</math></li> </ul> <p>Tolerâncias na diferença entre os valores de impedância de quaisquer dois transformadores do mesmo projeto, em relação ao valor declarado pelo fabricante</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— transformadores de dois enrolamentos <math>\pm 7,5 \%</math></li> <li>— transformadores de mais de dois enrolamentos <math>\pm 10 \%</math></li> <li>— transformadores com enrolamentos em zig-zague <math>\pm 10 \%</math></li> <li>— autotransformadores <math>\pm 10 \%</math></li> </ul> <p>São considerados aptos a trabalhar em paralelo os transformadores que obedecem aos limites acima especificados</p>	
02	Perdas em vazio (para qualquer tipo de transformador)	+ 10 %
03	Perdas totais (para qualquer tipo de transformador)	+ 6 %
04	<p>Relação de tensões em qualquer derivação</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— deve ser aplicada a menor das tolerâncias indicadas <math>\pm 0,5 \%</math></li> <li>— em transformadores providos de derivações, quando a tensão por espira for superior a 0,5 % da tensão de derivação respectiva, a tolerância especificada aplica-se ao valor da tensão correspondente à espira completa mais próxima <math>\pm 1/10</math> da impedância de curto-circuito, expressa em porcentagem</li> </ul>	
05	Corrente de excitação	+ 20 %
<p>NOTA 1 No caso de transformadores de mais de dois enrolamentos, as tolerâncias sobre as perdas se aplicam a cada par de enrolamentos, a menos que a garantia se aplique a uma combinação de cargas determinada.</p> <p>NOTA 2 Para certos autotransformadores e certos transformadores de reforço, um baixo valor de impedância justifica uma faixa de tolerância mais ampla. Os transformadores com larga faixa de derivações, particularmente aqueles com a faixa assimétrica, podem também requerer uma consideração especial. Tolerâncias especiais devem ser detalhadas no momento da especificação e devem fazer parte de acordo entre o fabricante e o comprador.</p>		

## 11 Ensaios

### 11.1 Condições gerais para os ensaios de rotina, tipo e especiais

Os transformadores devem ser submetidos aos ensaios descritos a seguir.

Os ensaios devem ser realizados a uma temperatura ambiente entre 10 °C e 40 °C e com água de resfriamento (se previsto) com temperatura que não exceda 30 °C.

Os ensaios devem ser realizados na fábrica do fabricante, salvo acordo contrário entre o comprador e o fabricante.

Todos os componentes externos e acessórios que são suscetíveis de influenciar o funcionamento do transformador durante os ensaios devem estar instalados.

Os enrolamentos com derivação devem estar conectados à sua derivação principal, a menos que seja especificado de outra forma nesta Norma ou por acordo entre o fabricante e o comprador.

Para todas as características, excetuando-se as de isolamento, os ensaios são baseados em condições nominais, a menos que seja especificado de outra forma no capítulo relativo ao ensaio em questão.

Quando for requerido que os resultados dos ensaios sejam corrigidos a uma temperatura de referência, estas devem ser:

- para transformadores imersos em óleo conforme Tabela 3;
- para transformadores secos: conforme recomendações gerais para ensaios da ABNT NBR 10295.

**Tabela 3 — Temperaturas de referência**

Limites de elevação de temperatura dos enrolamentos Método de variação da resistência °C	Temperatura de referência °C
55	75
65	85
95	115

#### 11.1.1 Ensaios de rotina

Os ensaios de rotina são os seguintes:

- a) medição da resistência dos enrolamentos (ver 11.2);
- b) medição da relação de transformação e polaridade e verificação do deslocamento angular e seqüência de fases (ver 11.3);
- c) medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga (ver 11.4);
- d) medição das perdas em vazio e corrente de excitação (ver 11.5);
- e) ensaios dielétricos de rotina (ver ABNT NBR 5356-3);
- f) ensaios de comutador de derivações em carga, quando aplicável (ver 11.8);



- g) medição da resistência de isolamento (ver 11.9);
- h) estanqueidade e resistência à pressão, a quente em transformadores subterrâneos de qualquer potência nominal e à temperatura ambiente nos demais transformadores de potência nominal igual ou superior a 750 kVA (ver 11.10);

NOTA O ensaio de estanqueidade e resistência à pressão em transformadores não incluídos nesta alínea são realizados por amostragem e mediante acordo entre o fabricante e o comprador.

- i) verificação do funcionamento dos acessórios (ver 11.10.2);
- j) ensaios de óleo isolante para transformadores de tensão nominal  $\geq 72,5$  kV, ou potência  $\geq 5$  MVA (ver 11.11);
  - rigidez dielétrica;
  - teor da água;
  - fator de perdas dielétricas ou fator de dissipação;
  - tensão interfacial;
- k) verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa de transformadores com  $U_m$  242 kV (ver 11.12);

#### 11.1.2 Ensaios de tipo

Os ensaios de tipo são os seguintes:

- a) ensaio de elevação de temperatura (ver ABNT NBR 5356-2);
- b) ensaios dielétricos de tipo (ver ABNT NBR 5356-3);
- c) ensaios de óleo isolante para transformadores de tensão nominal  $< 72,5$  kV:
  - rigidez dielétrica;
  - teor da água;
  - fator de perdas dielétricas ou fator de dissipação;
  - tensão interfacial.

#### 11.1.3 Ensaios especiais

Os ensaios especiais são os seguintes:

- a) ensaios dielétricos especiais (ver ABNT NBR 5356-3);
- b) medição das capacitâncias entre o enrolamento e a terra, e entre os enrolamentos (ver 11.16);
- c) medição das características da tensão transitória transferida (ver 11.17);
- d) medição da(s) impedância(s) de sequência zero em transformadores trifásicos (ver 11.7);
- e) ensaio de suportabilidade a curto-circuito (ver ABNT NBR 5356-5);

- f) determinação do nível de ruído audível (ver 11.18 e ABNT NBR 7277);
- g) medição de harmônicas da corrente de excitação (ver 11.6);
- h) medição da potência absorvida pelos motores das bombas de óleo e dos ventiladores (ver 11.19);
- i) medição do fator de dissipação ( $\tan \delta$ ) da isolação (medição do fator de potência do isolamento). Estes são valores de referência para comparação com medições no campo. Não são especificados limites para estes valores (ver 11.20)
- j) análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante (ver 11.13);
- k) vácuo interno (ver 11.14);
- l) ensaio para verificação do esquema de pintura das partes interna e externa do transformador, conforme ABNT NBR 11388 (ver 11.12);
- m) nível de tensão de radiointerferência (ver 10.15);
- n) medição da resposta em frequência e impedância terminal (ver 11.21);
- o) ensaio do grau de polimerização do papel (ver 11.22);
- p) medição do ponto de orvalho (ver 11.23);
- q) levantamento da curva de saturação e medição da reatância em núcleo em ar do enrolamento (ver 11.24);

## 11.2 Medição da resistência dos enrolamentos

### 11.2.1 Generalidades

A resistência de cada enrolamento, os terminais entre os quais ela for medida e a temperatura dos enrolamentos devem ser registrados. A medição deve ser efetuada em corrente contínua.

A resistência elétrica dos enrolamentos deve ser medida na derivação correspondente à tensão mais elevada. O comprador deve indicar as derivações adicionais para as quais o fabricante deve medir a resistência.

Em todas as medições de resistência, cuidados devem ser tomados para se reduzirem ao mínimo os efeitos de auto-indutância.

### 11.2.2 Transformadores do tipo seco

Antes de cada medição o transformador deve permanecer pelo menos 3 h desenergizado e em repouso à temperatura ambiente.

A resistência e a temperatura do enrolamento devem ser medidas simultaneamente. A temperatura do enrolamento deve ser medida através de sensores localizados em posições representativas, de preferência dentro dos enrolamentos, por exemplo, em um poço ou canal entre os enrolamentos de alta tensão e baixa tensão.

### 11.2.3 Transformadores imersos em óleo

Deixa-se o transformador com óleo desenergizado durante pelo menos 3 h, depois determina-se a temperatura média do óleo e considera-se que a temperatura do enrolamento é igual à temperatura média do óleo. A temperatura média do óleo é adotada como a média das temperaturas do óleo nas partes superior e inferior do tanque (topo e fundo do tanque).

Quando se mede a resistência a frio, com o propósito de determinar a elevação de temperatura, é necessário envidar esforços especiais para determinar com precisão a temperatura média do enrolamento. Portanto, a diferença entre as temperaturas do óleo das partes superior e inferior deve ser pequena. A fim de se obter este resultado mais rápido, pode-se fazer circular óleo com ajuda de uma bomba.

### 11.3 Medição da relação de transformação, polaridade e verificação do deslocamento angular e seqüência de fase

Mede-se a relação de transformação em cada derivação. Deve-se verificar a polaridade de transformadores monofásicos e o esquema de ligação para transformadores trifásicos.

### 11.4 Medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga

A impedância de curto-circuito e as perdas em carga para um par de enrolamentos devem ser medidas à frequência nominal, aplicando-se uma tensão praticamente senoidal aos terminais de um enrolamento e mantendo-se os terminais do outro enrolamento curto-circuitados. Os demais enrolamentos, se existirem, devem estar em circuito aberto (para a escolha da derivação para ensaio, ver 6.5 e 6.6). A corrente de alimentação deve ser pelo menos igual a 50 % da corrente nominal (corrente de derivação). As medidas devem ser feitas rapidamente para que as elevações de temperatura não introduzam erros significativos. A diferença de temperatura do óleo entre as partes superior e inferior do tanque deve ser suficientemente pequena para permitir a determinação da temperatura média, com a precisão requerida. Se o sistema de resfriamento for OF ou OD, pode-se fazer circular óleo através de uma bomba para mistura do óleo.

O valor de perdas em carga medido deve ser multiplicado pelo quadrado da relação entre a corrente nominal (corrente de derivação) e a corrente utilizada no ensaio. O valor obtido deve ser corrigido à temperatura de referência (ver 11.1). As perdas por efeito Joule  $I^2R$  ( $R$  sendo a resistência a corrente contínua) variam segundo a resistência do enrolamento e as outras perdas são inversamente proporcionais à resistência. A resistência deve ser determinada conforme 11.2. O método de correção da temperatura é dado no Anexo D.

A impedância de curto-circuito é representada por uma reatância e uma resistência em corrente alternada em série. O valor de impedância deve ser corrigido à temperatura de referência, assumindo-se que a reatância é constante e que a resistência em corrente alternada calculada a partir das perdas em carga varia como visto acima.

Para transformadores com um enrolamento com derivações com faixa de derivações  $> \pm 5 \%$ , a impedância de curto-circuito deve ser medida na derivação principal e nas derivações extremas.

Para transformadores de três enrolamentos, as medições são feitas para os três pares de enrolamentos. Os resultados são recalculados considerando-se as impedâncias e as perdas de cada enrolamento (ver Anexo E). As perdas totais para casos de carregamentos específicos dos enrolamentos são determinadas como consequência.

**NOTA 1** Para transformadores com dois enrolamentos secundários com mesma potência nominal, a mesma tensão nominal e a mesma impedância em relação ao primário (algumas vezes chamados transformadores “com secundário duplo”), pode ser acordado estudar a simetria da carga em um ensaio suplementar colocando-se simultaneamente em curto-circuito os dois enrolamentos.

**NOTA 2** A medição de perdas em carga para grandes transformadores requer muitos cuidados e bons equipamentos de medição, devido ao baixo fator de potência e às altas correntes de ensaio. É necessário corrigir erros de medição devidos aos transformadores de medição ou à resistência das conexões utilizadas durante os ensaios, salvo se estas forem consideradas desprezíveis (ver Anexo E).

### 11.5 Medição de perdas em vazio e corrente de excitação

As perdas em vazio e a corrente de excitação devem ser medidas em um dos enrolamentos à frequência nominal e com tensão igual à tensão nominal, se o ensaio for realizado na derivação principal, ou igual à tensão de derivação apropriada, se o ensaio for realizado em outra derivação. Os demais enrolamentos devem ser deixados em circuito aberto e quaisquer enrolamentos que podem ser conectados em triângulo aberto devem ter o triângulo fechado.

O transformador deve estar aproximadamente à temperatura ambiente da fábrica.

Para um transformador trifásico, a escolha do enrolamento e a conexão à fonte de potência de ensaio devem ser feitas de modo a permitir que as tensões nas três fases sejam tão simétricas e senoidais quanto possível.

A tensão de ensaio deve ser ajustada por um voltímetro que mede o valor médio da tensão, mas que é graduado de modo a fornecer o valor eficaz de uma tensão senoidal com o mesmo valor médio. O valor lido por este voltímetro é  $U'$ .

Simultaneamente, um voltímetro medindo o valor eficaz da tensão deve estar conectado em paralelo com o voltímetro de valor médio, e a tensão  $U$  que ele indica deve ser registrada.

Quando um transformador trifásico é ensaiado, as tensões devem ser medidas entre os terminais de fase, se um enrolamento triângulo for energizado, e entre os terminais de fase e neutro, se um enrolamento YN ou ZN for energizado.

A forma de onda da tensão de ensaio é satisfatória se  $U'$  e  $U$  forem iguais com desvio máximo de 3 %.

NOTA As condições mais severas de carga para a exatidão da fonte de tensão de ensaio são geralmente impostas pelos grandes transformadores monofásicos.

As perdas em vazio medidas são  $P_m$  e as perdas em vazio corrigidas são tomadas iguais a:

$$P_o = P_m (1 + d)$$

$$d = \frac{U' - U}{U'} \quad (\text{habitualmente negativo})$$

Se a diferença das leituras entre os voltímetros for maior que 3 %, a validade do ensaio deve ser objeto de acordo.

O valor eficaz da corrente de excitação e o valor das perdas são medidos simultaneamente. Para um transformador trifásico, toma-se a média dos valores das três fases.

NOTA Para decidir a ordem de execução do ensaio de perdas em vazio dentro da seqüência completa dos ensaios, é conveniente considerar que as perdas em vazio medidas antes dos ensaios de impulso e/ou elevação de temperatura são geralmente representativas do nível de perdas médias em serviço prolongado. Se este ensaio for feito depois dos outros, pode-se eventualmente medir valores maiores devido a pequenos arcos que se produzem entre as bordas das lâminas do núcleo durante os ensaios de impulso etc. Estas medidas podem ser menos representativas para as perdas em serviço.

## 11.6 Medição de harmônicas da corrente de excitação

As componentes harmônicas da corrente de excitação nas três fases são medidas e as amplitudes das harmônicas são expressas em percentagem da componente fundamental.

## 11.7 Medição de impedância(s) de seqüência zero em transformadores trifásicos

A impedância de seqüência zero é medida à freqüência nominal entre os terminais de linha reunidos conjuntamente e o neutro de um enrolamento conectado em estrela ou zigzag. Ela é 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 de ensaio  $I/3$  em cada fase deve ser indicada no relatório de ensaios.

Deve-se assegurar que a corrente na conexão de neutro é compatível com sua capacidade de condução.

No caso de um transformador com um enrolamento adicional conectado em triângulo, o valor da corrente de ensaio deve ser tal que a corrente no enrolamento conectado em triângulo não seja excessiva, levando-se em conta a duração da aplicação.

Se a condição de equilíbrio de ampéres-espiras não for satisfeita no sistema de seqüência zero, por exemplo, em um transformador estrela-estrela sem um enrolamento em triângulo, a tensão aplicada não deve exceder a tensão nominal entre fase-neutro. É conveniente que as correntes do neutro e a duração da aplicação sejam limitadas, a fim de evitar temperaturas excessivas nas partes metálicas construtivas.

No caso de transformadores com mais de um enrolamento estrela com terminal de neutro, a impedância de sequência zero depende das ligações (ver 3.7.3) e os ensaios a efetuar devem ser objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

Os autotransformadores com um terminal de neutro destinado a aterramento permanente devem ser tratados como transformadores normais de dois enrolamentos conectados em estrela. Desta forma o enrolamento série e o enrolamento comum formam um único circuito de medição e o enrolamento comum sozinho forma o outro. As medições são efetuadas com uma corrente que não exceda a diferença entre as correntes nominais dos lados de baixa tensão e alta tensão.

NOTA 1 Quando não existir o equilíbrio de ampère-espira entre os enrolamentos, a relação entre tensão e a corrente é geralmente não linear. Neste caso, várias medições com valores diferentes de corrente podem fornecer informações úteis.

NOTA 2 A impedância de sequência zero depende da disposição física dos enrolamentos e partes magnéticas, e as medições sobre diferentes enrolamentos podem, por este motivo, ser discordantes.

## 11.8 Ensaios no comutador em carga

### 11.8.1 Ensaio funcional

Com o comutador de derivações completamente montado no transformador, a sequência de operações seguinte deve ser efetuada sem nenhuma falha:

- oito ciclos completo de funcionamento, com o transformador desenergizado (um ciclo de funcionamento vai de um extremo da faixa de derivação ao outro extremo, retornando em seguida);
- um ciclo completo de funcionamento, com o transformador desenergizado, com 85 % da tensão nominal de alimentação dos auxiliares;
- um ciclo completo de funcionamento com o transformador energizado, em vazio, à tensão e frequência nominais;
- com um enrolamento em curto-circuito e com a corrente mais próxima possível da corrente nominal no enrolamento com derivações, dez operações de mudança de derivações entre dois degraus de cada lado da posição onde o seletor de reversão de derivações opera, ou de outra forma em torno da derivação central.

### 11.8.2 Ensaio de isolamento dos circuitos auxiliares

Com o comutador de derivações montado no transformador, um ensaio de tensão suportável na frequência industrial deve ser aplicado aos circuitos auxiliares, como especificado na ABNT NBR 5356-3.

## 11.9 Resistência de isolamento

A resistência de isolamento deve ser medida antes dos ensaios dielétricos. Este ensaio não constitui critério para aprovação ou rejeição do transformador.

### 11.10 Estanqueidade e resistência à pressão

Este ensaio deve ser realizado antes do início ou após o término dos ensaios dielétricos. No caso de ser efetuada a análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante, o ensaio deve ser realizado antes da retirada da primeira amostra ou após a retirada da amostra que se segue aos ensaios dielétricos. Os transformadores devem suportar as pressões manométricas de ensaio especificadas na Tabela 4, durante o tempo especificado nesta mesma Tabela.

NOTA O ensaio de estanqueidade e resistência à pressão para os transformadores não incluídos na alínea h) de 11.1.1 deve ser realizado por amostragem e mediante acordo entre fabricante e comprador.



Tabela 4 — Valores para ensaio de estanqueidade e resistência à pressão

Tipo do transformador	Pressão manométrica MPa	Tempo de aplicação h
Selado com colchão de gás	0,07	1
Selado de enchimento integral	0,01	1
Não selado, com tensão máxima do equipamento superior a 72,5 kV ou potência nominal superior a 10 MVA	0,05	24
Não selado, com tensão máxima do equipamento inferior a 72,5 kV ou potência nominal inferior a 10 MVA	0,03	24

#### 11.10.1 Estanqueidade e resistência à pressão a quente (transformadores subterrâneos)

Transformadores subterrâneos devem ser ensaiados a quente. A duração do ensaio é de 8 h, e durante este período o transformador não deve apresentar vazamentos e sua pressão interna não deve exceder 0,05 MPa (0,5 kgf/cm<sup>2</sup>).

#### 11.10.2 Verificação do funcionamento dos acessórios

Os critérios de aceitação dos acessórios são os constantes nas normas específicas. Os ensaios funcionais devem ser realizados de acordo com o Anexo E.

#### 11.11 Ensaios de óleo mineral isolante

Os critérios de aceitação do óleo mineral isolante, após contato com o equipamento, são indicados na Tabela 5.

NOTA Para fins de verificação das características, considera-se óleo novo, após contato com o equipamento, aquele amostrado do transformador, depois do primeiro enchimento, antes dos ensaios de fábrica e após no mínimo 24 h de repouso.

Tabela 5 — Características do óleo mineral isolante, após contato com o equipamento

Características			Método de ensaio	Unidade	Valores garantidos	
					Mínimo	Máximo
Tensão interfacial a 25 °C			ABNT NBR 6234	mN/m	40	-
Teor de água		$U_n < 72,5 \text{ kV}$	ABNT NBR 5755			25
		$U_n \geq 72,5 \text{ kV}$				15
Rigidez dielétrica		$U_n < 72,5 \text{ kV}$	ABNT NBR 6869	KV	30	
		$U_n < 72,5 \text{ kV}$	ABNT NBR IEC 60156		50	
		$U_n \geq 72,5 \text{ kV}$			70	
Fator de perdas dielétricas ou Fator de dissipação	a 100 °C	$U_n < 72,5 \text{ kV}$	ASTM D924	%	-	0,90
		$U_n \geq 72,5 \text{ kV}$			-	0,6
	a 90 °C	$U_n < 72,5 \text{ kV}$	IEC 60247		-	0,7
		$U_n \geq 72,5 \text{ kV}$			-	0,5



## 11.12 Verificação da espessura e aderência da pintura das partes externa e interna

Os métodos e critérios de aceitação desses ensaios estão referenciados na ABNT NBR 11388.

### 11.12.1 Para transformadores com $U_m \geq 242$ kV

Os ensaios devem ser realizados conforme:

- e) espessura: a espessura especificada deve ser medida em pelo menos três pontos do tanque principal e em um ponto da tampa do transformador;
- f) aderência: a aderência especificada na ABNT NBR 11388 deve ser verificada pelo método do corte em grade ou pelo método do corte em X, de acordo com a ABNT NBR 11003. Para sistemas de pinturas especiais (pintura sobre galvanização etc.), deve ser usado o método do corte em X.

### 11.12.2 Para transformadores com $U_m < 242$ kV

Os ensaios são realizados por amostragem e conforme procedimentos de 11.13.1.

## 11.13 Análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante

A retirada de amostra de óleo para esse ensaio deve ser feita:

- a) antes do início dos ensaios;
- b) após os ensaios dielétricos;
- c) após o ensaio de elevação de temperatura, caso seja realizado.

O critério de aceitação dos valores medidos deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

## 11.14 Vácuo interno

Este ensaio só é aplicável a transformadores imersos em líquido isolante, com potência igual ou superior a 750 kVA. O tanque, os radiadores e os demais acessórios, exceto o comutador, devem suportar pleno vácuo. O transformador sem líquido isolante deve ser submetido a vácuo no seu interior, de modo que a pressão de ensaio seja como indicado na Tabela 6 por um período de 4 h.

**Tabela 6 — Valores de pressão absoluta no ensaio de vácuo**

Potência nominal do transformador ( $P$ )	Pressão
$750 \text{ kVA} < P < 10\,000 \text{ kVA}$	268 Pa (2 mm Hg)
$P \geq 10\,000 \text{ kVA}$	134 Pa (1 mm Hg)

O limite máximo para deslocamento residual, medido conforme E.28, deve ser:

$$Dr = H/400$$

$Dr$  = deslocamento residual, expresso em milímetros (mm).

$H$  = altura da parede do tanque, expresso em milímetros (mm).

### 11.15 Ensaio de nível de tensão de radiointerferência

Os níveis de tensão de radiointerferência produzidos por transformadores não devem ultrapassar os limites estabelecidos mediante acordo entre fabricante e comprador, quando medidos de acordo com a ABNT NBR 7876.

### 11.16 Determinação das capacitâncias entre enrolamentos e a terra e entre os enrolamentos

É considerado ensaio especial e deve ser realizado em comum acordo entre o fabricante e o comprador.

### 11.17 Determinação das características da tensão transitória transferida

É considerado ensaio especial e deve ser realizado em comum acordo entre o fabricante e o comprador (ver Anexo B da ABNT NBR 5356-3:2007).

### 11.18 Determinação do nível de ruído audível

É considerado ensaio especial e deve ser realizado conforme a ABNT NBR 7277. Os níveis de ruído não devem exceder os níveis especificados nas Tabelas 7, 8 e 9. Os valores destas Tabelas não se aplicam aos transformadores equipados com comutadores sob carga, durante a operação destes e durante a operação de relés auxiliares e chaves de controle associadas a esta operação.

NOTA Para transformadores de potências e tensões não classificadas nas Tabelas 8 e 9, os níveis médios de ruído devem ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

### 11.19 Medição da potência absorvida pelos motores das bombas e dos ventiladores

É considerado ensaio especial e deve ser realizado em comum acordo entre o fabricante e o comprador.

### 11.20 Medição do fator de potência do isolamento

Este ensaio deve preceder os ensaios dielétricos e pode ser repetido após estes, desde que solicitado pelo comprador, para efeito de comparação com os valores anteriormente obtidos.

### 11.21 Medição de resposta em frequência e impedância terminal

Esta medição deve ser realizada no transformador com vista a se obter uma radiografia do transformador ao sair da fábrica. A comparação com medições feitas no campo pode indicar possíveis danos internos ocorridos durante o transporte ou operação. Recomenda-se que este ensaio seja realizado em todas as unidades.

#### 11.21.1 Medição da resposta em frequência

Mede-se a relação de transformação do transformador de potência na faixa de frequência, de pelo menos entre 20 Hz a 1 MHz, aplicando-se uma tensão senoidal de 5 V a 10 V a um dos enrolamentos do transformador e medindo-se a transferência desta tensão para o outro enrolamento. O método de medição deve ser objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

#### 11.21.2 Medição da impedância terminal

Mede-se a impedância nos terminais do transformador de potência na faixa de frequência, de pelo menos entre 20 Hz a 1 MHz, com aproximadamente 200 pontos de medição. O método de medição deve ser objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

### 11.22 Ensaio do grau de polimerização do papel

É considerado ensaio especial e o número de amostras e o valor-limite devem ser objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

### 11.23 Medição do ponto de orvalho

É considerado ensaio especial e os parâmetros de ensaio devem constituir objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

### 11.24 Levantamento da curva de magnetização e medição da reatância em núcleo de ar

É considerado ensaio especial e os parâmetros de ensaio devem constituir objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

**Tabela 7 — Níveis de ruído para transformadores em óleo, de potência nominal igual ou inferior a 500 kVA**

Nível médio de ruído dB	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos kVA
48	1 – 50
51	51 – 100
55	101 – 300
56	301 – 500

Tabela 8 — Níveis de ruído para transformadores em óleo de potência nominal superior a 500 kVA

Nível de ruído médio dB	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos <sup>a</sup>								
	kVA								
	I.A. até 350 kV <sup>b</sup>			I.A. de 380 kV a 650 kV <sup>b</sup>			I.A. de 750 kV a 850 kV <sup>b</sup>		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
57	700								
58	1 000								
59	-			700					
60	1 500			1 000					
61	2 000								
62	2 500			1 500					
63	3 000			2 000					
64	4 000			2 500					
65	5 000			3 000					
66	6 000			4 000			3 000		
67	7 000	6 250 <sup>c</sup>		5 000	3 750 <sup>c</sup>		4 000	3 125 <sup>c</sup>	
68	10 000	7 500		6 000	5 000		5 000	3 750	
69	12 500	9 375		7 500	6 250		6 000	5 000	
70	15 000	12 500		10 000	7 500		7 500	6 250	
71	20 000	16 667		12 500	9 375		10 000	9 375	
72	25 000	20 000	20 800	15 000	12 500		12 500	9 375	
73	30 000	26 667	25 000	20 000	16 667		15 000	12 500	
74	40 000	33 333	33 333	25 000	20 000	20 800	20 000	16 667	
75	50 000	40 000	41 667	30 000	26 667	25 000	25 000	20 000	20 800
76	60 000	53 333	50 000	40 000	33 333	33 333	30 000	26 667	25 000
77	80 000	66 667	66 667	50 000	40 000	41 667	40 000	33 333	33 333
78	100 000	80 000	83 333	60 000	53 333	50 000	50 000	40 000	41 687
79		106 667	100 000	80 000	66 667	66 667	60 000	53 333	50 000
80		133 333	133 333	100 000	80 000	83 333	80 000	66 667	66 667
81			166 667		106 667	100 000	100 000	80 000	83 333
82			200 000		133 337	133 333		106 667	100 000
83			250 000			166 667		133 333	133 333
84			300 000			200 000			166 667

Tabela 8 (conclusão)

Nível de ruído médio dB	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos <sup>a</sup> kVA								
	I.A. até 350 kV <sup>b</sup>			I.A. de 380 kV a 650 kV <sup>b</sup>			I.A. de 750 kV a 850 kV <sup>b</sup>		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
85			400 000			250 000			200 000
86						300 000			300 000
87						400 000			350 000
88									400 000

<sup>a</sup> Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos: é a metade da soma das potências nominais aparentes nos terminais de todos os enrolamentos do transformador.

<sup>b</sup> I.A: Tensão suportável a impulso atmosférico.

<sup>c</sup> 67 dB para todas as potências nominais até este valor.

NOTA 1 Tipo de resfriamento:

(1) ONAN, OFWF, ODWF.

(2) ONAF, OFAF, ODAF, com primeiro estágio de resfriamento em funcionamento.

(3) OFAF, ODAF, com trocador de calor, ONAF, OFAF, ODAF com segundo estágio de resfriamento em funcionamento.

NOTA 2 Para valores intermediários de potência, usar o nível médio de ruído superior mais próximo.

NOTA 3 Nas colunas (2) e (3), os níveis de ruído são considerados com o equipamento de resfriamento auxiliar em funcionamento.

Tabela 9 — Níveis de ruído para transformadores em óleo de potência nominal superior a 500 kVA

Nível de ruído médio dB	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos <sup>a</sup>								
	kVA								
	I.A. de 950 kV a 1 050 kV <sup>b</sup>			I.A. 1 175 kV <sup>b</sup>			I.A. de 1 300 kV a 2 100 kV <sup>b</sup>		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
73	12 500								
74	15 000			12 500					
75	20 000	16 667		15 000			12 500		
76	25 000	20 000	20 800	20 000	16 667		15 000		
77	30 000	26 667	25 000	25 000	20 000	20 800	20 000	16 667	
78	40 000	33 333	33 333	30 000	26 667	25 000	25 000	20 000	20 800
79	50 000	40 000	41 667	40 000	33 333	33 333	30 000	26 667	25 000
80	60 000	53 333	50 000	50 000	40 000	41 667	40 000	33 333	33 333
81	80 000	66 667	66 667	60 000	53 333	50 000	50 000	40 000	41 667
82	100 000	80 000	83 333	80 000	66 667	66 667	60 000	53 333	50 000
83		106 667	100 000	100 000	80 000	83 333	80 000	66 667	66 667
84		133 333	133 333		106 667	100 000	100 000	80 000	83 333
85			166 667		133 333	133 333		106 667	100 000
86			200 000			166 667		133 333	133 333
87			250 000			200 000			166 667
88			300 000			250 000			200 000
89			400 000			300 000			250 000
90						400 000			300 000
91									400 000

<sup>a</sup> Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos: é a metade da soma das potências nominais aparentes nos terminais de todos os enrolamentos do transformador.

<sup>b</sup> I.A: Tensão suportável a impulso atmosférico.

NOTA 1 Tipo de resfriamento:

(1) ONAN, OFWF, ODWF.

(2) ONAF, OFAF, ODAF, com primeiro estágio de resfriamento em funcionamento.

(3) OFAF, ODAF, com trocador de calor, ONAF, OFAF, ODAF com segundo estágio de resfriamento em funcionamento.

NOTA 2 Para valores intermediários de potência, usar o nível médio de ruído superior mais próximo.

NOTA 3 Nas colunas (2) e (3), os níveis de ruído são considerados com o equipamento de resfriamento auxiliar em funcionamento.



## Anexo A (normativo)

### Informações a serem fornecidas em especificações técnicas e pedidos de compra

#### A.1 Características nominais e requisitos gerais

##### A.1.1 Condições normais

As seguintes informações devem ser fornecidas em todos os casos:

- a) requisitos especiais que o transformador deve satisfazer;
- b) tipo de transformador, por exemplo transformador com enrolamentos separados, autotransformador ou transformador de reforço;
- c) transformadores monofásicos ou trifásicos;
- d) número de fases da rede;
- e) frequência;
- f) transformador tipo seco ou imerso em óleo. Se do tipo imerso em óleo, indicar se é óleo mineral ou outro tipo de líquido isolante. Para transformador do tipo seco, indicar o grau de proteção (ver ABNT NBR IEC 60529);
- g) tipo exterior ou interior;
- h) sistema de resfriamento;
- i) potência nominal de cada enrolamento e, no caso em que a faixa de derivação ultrapassa  $\pm 5\%$ , a derivação de máxima corrente, se aplicável.

Se o transformador for especificado com mais de um sistema de resfriamento, é necessário fornecer os níveis de potência inferiores juntamente com a potência nominal (que corresponde ao sistema de resfriamento mais eficaz);

- j) tensões nominais para cada enrolamento;
- k) para transformador com derivações:
  - qual é o enrolamento com derivações, o número de derivações, a faixa de derivações ou degrau de derivação;
  - se o comutador é do tipo “comutador de derivações em carga” ou “comutador de derivações sem tensão”;
  - se a faixa de derivação é superior a  $\pm 5\%$ , o tipo de regulação e a posição da derivação de máxima corrente, se aplicável (ver 6.4);
- l) tensão máxima do equipamento ( $U_m$ ) de cada enrolamento do transformador (para as características do isolamento, ver ABNT NBR 5356-3);

- m) condições de aterramento do sistema (para cada enrolamento);
- n) nível de isolamento, para cada enrolamento (ver ABNT NBR 5356-3);
- o) símbolo de ligação e terminais de neutro, para cada enrolamento, se requerido;
- p) particularidades de instalação, de montagem, de transporte e de manutenção. Limitações quanto a dimensões e massa. Para requisitos de transporte e instalação, utiliza-se a ABNT NBR 7036 ou ABNT NBR 7037, a que for aplicável;
- q) dados sobre tensão de alimentação dos serviços auxiliares (bombas e ventiladores, comutador de derivações, alarmes etc.);
- r) acessórios requeridos e indicação do local de instalação dos instrumentos, indicadores de nível de óleo, placas de identificação etc.;
- s) tipo de sistema de preservação de óleo;
- t) para transformadores com mais de dois enrolamentos, as combinações de carga requeridas indicando separadamente, quando necessário, suas componentes ativas e reativas, notadamente no caso de autotransformadores de mais de dois enrolamentos.

### **A.1.2 Condições particulares**

As seguintes informações adicionais podem ser necessárias:

- a) se um ensaio de impulso for solicitado, indicar se o ensaio de onda cortada é necessário (ver ABNT NBR 5356-3);
- b) indicar se é requerido um enrolamento de estabilização e, neste caso, indicar o método de aterramento;
- c) impedância de curto-circuito, ou faixa de variação da impedância (ver Anexo C). Para transformadores com mais de dois enrolamentos, as impedâncias que são especificadas para os pares de enrolamentos (com as derivações e potências de referência se os valores forem fornecidos em percentagem);
- d) as tolerâncias sobre as relações de transformação e as impedâncias de curto-circuito sujeitos a acordo, conforme Tabela 2, ou caso sejam diferentes dos valores fornecidos nesta Tabela;
- e) se o transformador deve ser conectado a um gerador diretamente ou através de um equipamento de conexão, e se ele estará sujeito a condições de rejeição de carga;
- f) se um transformador deve ser conectado diretamente ou através de uma linha aérea curta a um barramento blindado isolado a gás;
- g) altitude acima do nível do mar, se esta ultrapassar 1 000 m;
- h) condições particulares de temperatura ambiente (ver 4.1b) ), ou restrições à circulação do ar de resfriamento;
- i) atividade sísmica presumida no campo que deve requerer consideração especial;
- j) limites dimensionais particulares que podem ter conseqüências sobre as distâncias de isolamento e a posição dos terminais do transformador;
- k) se a forma de onda da corrente de carga pode ser fortemente distorcida ou se uma carga trifásica desequilibrada é prevista. Nos dois casos, devem ser fornecidos detalhes;

- l) se os transformadores são submetidos a sobrecorrentes freqüentes, por exemplo, transformadores de fornos ou de tração;
- m) detalhes de sobrecargas cíclicas regulares previstas, outras que não as consideradas em 5.2 (para permitir o estabelecimento de especificações de acessórios do transformador);
- n) outras condições de operação excepcionais;
- o) se o transformador tiver alternativas de ligações dos enrolamentos, como elas devem ser alteradas e qual ligação é requerida ao sair da fábrica;
- p) características de curto-circuito da rede (dados pela potência ou a corrente de curto-circuito, ou dados de impedância da rede) e eventuais limites que afetem a concepção do transformador (ver ABNT NBR 5356-5);
- q) se as medições de ruído audível devem ser realizadas (ver ABNT NBR 7277);
- r) suportabilidade a vácuo do tanque do transformador e, se possível, do conservador, se um valor específico for exigido;
- s) todo ensaio especial que possa ser exigido;
- t) perdas em carga, perdas em vazio e perdas totais, corrigidas à temperatura de referência apropriada para uma ou varias derivações, alternativamente pode ser especificada fórmula de capitalização das perdas.

## A.2 Operação em paralelo

Se for prevista a operação em paralelo com transformadores existentes, é necessário fornecer as seguintes informações sobre os transformadores existentes:

- a) potência nominal;
- b) relação de transformação nominal;
- c) relação de transformação correspondente às derivações outras que não a derivação principal;
- d) perdas em carga à corrente nominal na derivação principal, corrigidas à temperatura de referência apropriada;
- e) impedância de curto-circuito sobre a derivação principal e pelo menos sobre as derivações extremas, se a faixa de derivações do enrolamento com derivações ultrapassar  $\pm 5\%$ ;
- f) diagrama fasorial, ou símbolo de ligação, ou ambos;
- g) diagramas elétricos de comando do acionamento motorizado e esquema do paralelismo.

NOTA Informações suplementares são geralmente necessárias para transformadores com mais de dois enrolamentos.

### A.3 Folha de dados técnicos

Este modelo de folha de dados técnicos é sugerido para registrar as características nominais e valores garantidos ou informativos de transformadores a ser utilizado em ofertas ou propostas técnicas.

FOLHA DE DADOS - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO														
CLIENTE:								PROPOSTA N°						
ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA:								REVISÃO						
NORMAS:								DATA:						
1. CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO														
TIPO								LIMITES DE TEMPERATURA						
NÚMERO DE FASES								AMBIENTE MÁXIMO		°C				
FREQÜÊNCIA		Hz												
LÍQUIDO ISOLANTE								ELEVAÇÃO TOPO DO ÓLEO		°C				
DIAGRAMA FASORIAL								ELEVAÇÃO ENROLAMENTO MÉDIO		°C				
ALTITUDE INSTALAÇÃO		msnm						ELEVAÇÃO PONTO MAIS QUENTE		°C				
TERMINAL	POTÊNCIA NOMINAL			TENSÃO NOMINAL			TENSÃO		LIGAÇÃO	TIPO DE				
	MVA			kV			MÁXIMA DO							
	SISTEMA DE RESFRIAMENTO						EQUIPAMENTO							
							kV							
2. CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO														
REFERÊNCIAS														
2.1	Potência de referência		kVA											
2.2	Tensões de referência		kV											
2.3	Impedância de sequência positiva a	°C	%											
2.4	Perdas em vazio a	%Vn	kW											
2.5	Perdas em carga a	°C	kW											
2.6	Perdas totais a	°C	kW											
2.7	Corrente de excitação a	%Vn	%											
2.8														
2.9														
2.10	Nível de ruído	%Vn	dB											
3. DIMENSÕES E PESOS APROXIMADOS							4. RENDIMENTO E REGULAÇÃO							
Dimensões aproximadas			mm		Massas aproximadas		kg		Base		kVA		Relação	
									FP		%kVA		Rend. Reg.	
Altura			Montado		Transporte		Parte ativa							
Comprimento							Tanque e acessórios							
Largura							Óleo mineral							
							Massa total		1.0		75		0.8	
							Para transporte				50			
											25			
5. NÍVEIS DE ISOLAMENTO														
ENSAIOS				TERMINAIS										
Impulso atmosférico														
Onda plena				kV										
Onda cortada				kV										
Impulso de manobra				kV										
Tensão aplicada				kV										
Tensão induzida de curta duração				kV										
Tensão induzida de longa duração				kV										
Notas:														

## Anexo B (informativo)

### Exemplos de especificações de transformadores com derivações

#### B.1 Exemplo 1 – Variação de tensão a fluxo constante (VTFC)

Transformador trifásico de 66 kV/20 kV, 40 MVA, com derivações no enrolamento 66 kV, faixa  $\pm 10\%$  em 11 posições de regulação.

Notação abreviada:	$(66 \pm 5 \times 2\%) / 20 \text{ kV}$
Categoria de regulação:	VTFC
Potência nominal:	40 MVA
Tensões nominais:	66 kV / 20 kV
Enrolamento com derivações:	66 kV (faixa de derivação $\pm 10\%$ )
Número de posições:	11

Se o transformador deve ter derivações com potência reduzida, a partir da derivação - 6 %, acrescentar:

Derivação de máxima corrente:	derivação - 6 %
-------------------------------	-----------------

A corrente de derivação do enrolamento AT é, portanto, limitada a 372 A a partir da derivação - 6 % até a derivação extrema - 10 %, onde a potência de derivação é reduzida a 38,3 MVA.

#### B.2 Exemplo 2 – Variação de tensão a fluxo variável (VTFV)

Transformador trifásico de 66 kV/6 kV, 20 MVA, com derivação no enrolamento de AT, faixa + 15 %, - 5 %, mas tendo uma tensão de derivação constante para o enrolamento de AT e variável para o enrolamento de BT entre:

$6/0,95 = 6,32 \text{ kV}$ e $6/1,15 = 5,22 \text{ kV}$	
Categoria de regulação:	VTFV
Potência nominal:	20 MVA
Tensões nominais:	66 kV/6 kV
Enrolamento com derivações:	66 kV (faixa de derivações +15 %, - 5 %)
Número de derivações:	13
Tensões de derivação do enrolamento 6 kV:	6,32 kV, 6 kV, 5,22 kV

Se o transformador deve ter derivações de potência reduzida, acrescentar por exemplo:

Derivação de máxima corrente:	derivação + 5 %.
-------------------------------	------------------

A corrente de derivação do enrolamento sem derivações (BT) é portanto limitada a 2 020 A da derivação + 5 % até a derivação extrema + 15 %, onde a potência de derivação é reduzida a 18,3 MVA.

### B.3 Exemplo 3 – Variação combinada de tensão (VCT)

Transformador trifásico 160 kV/20 kV, 40 MVA com derivações no enrolamento 160 kV com faixa de  $\pm 15\%$ . O ponto de descontinuidade (derivação de máxima tensão) é a derivação + 6 %, e a derivação de máxima corrente na categoria de regulação VTFC é a derivação - 9 %:

Tensão nominal: 160 kV, faixa  $\pm 10 \times 1,5\%$

Demais grandezas conforme Tabela B.1.

**Tabela B.1 — Variação combinada de tensão (VCT)**

Derivações	Relação de transformação	Tensão de derivação		Corrente de derivação		Potência de derivação
		$U_{AT}$ kV	$U_{BT}$ kV	$I_{AT}$ A	$I_{BT}$ A	S MVA
1 (+15 %)	9,20	169,6	18,43	125,6	1 155	36,86
7 (+6 %)	8,48	169,6	20	136,2	1 155	40
11 (0 %)	8	160	20	144,4	1 155	40
17(-9 %)	7,28	145,6	20	158,7	1 155	40
21 (-15 %)	6,80	136	20	158,7	1 080	37,4

NOTA 1 Completando-se com dados de derivações intermediárias, esta Tabela pode ser utilizada na placa de identificação.

NOTA 2 Comparar esta especificação com as especificações VTFC, que seriam:  
(160  $\pm$  15 %)/20 kV - 40 MVA

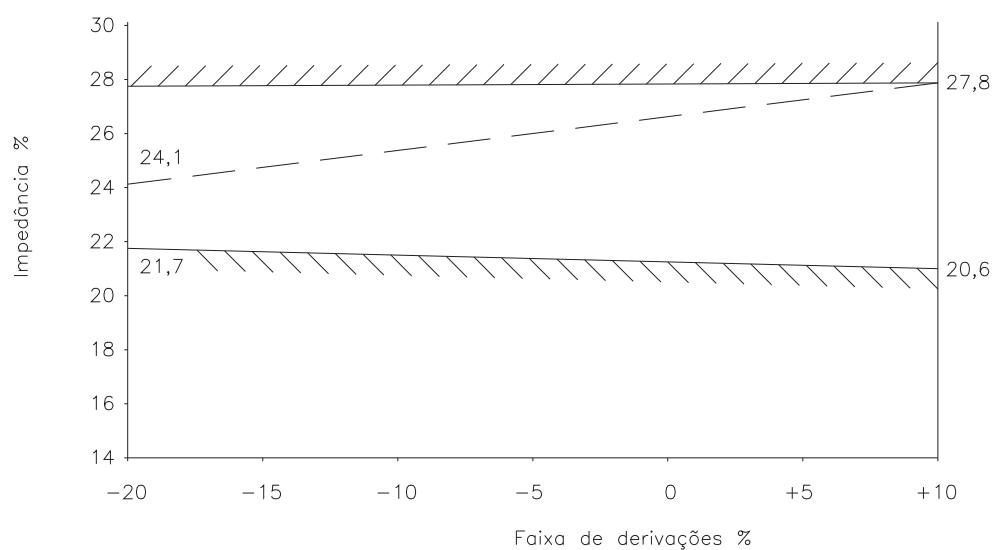
A única diferença é que a tensão de derivação AT não ultrapassa a “tensão máxima da rede” do lado de AT, que é, no exemplo, 170 kV. O valor da “tensão máxima do equipamento”, que caracteriza o isolamento dos enrolamentos, é também de 170 kV (ver ABNT NBR 5356-3).



## Anexo C (informativo)

### Especificação de impedância de curto-circuito por limites

A Figura C.1 mostra um exemplo de especificação de impedância de curto-circuito por limites.



O limite superior é um valor constante de impedância de curto-circuito em porcentagem, que é determinado pela queda de tensão admissível para uma certa carga e um fator de potência especificado.

O limite inferior é determinado pela sobrecorrente permissível no lado secundário, durante um curto-circuito franco.

A linha tracejada é um exemplo de curva de impedância de curto-circuito de um transformador que satisfaz esta especificação.

**Figura C.1 — Exemplo de especificação de impedância de curto-circuito por limites**

## Anexo D (normativo)

### Influência da temperatura nas perdas em carga

Lista de símbolos:

Índice 1: refere-se às medidas de “resistência a frio do enrolamento” (ver 11.2);

Índice 2: indica condições durante as medições de perdas em carga (ver 11.4);

$r$  : Indica condições à “temperatura de referência” (ver 11.1);

$R$  : Resistência;

$\theta$  : Temperatura do enrolamento, em graus Celsius (°C);

$P$  : Perdas em carga;

$I$  : Corrente de carga especificada para determinar as perdas (corrente nominal, corrente de derivação, outros valores especificados correspondentes a casos de cargas particulares);

$P_a$  : “Perdas suplementares”;

A medição da resistência do enrolamento é feita à temperatura  $\theta_1$ ;

O valor medido é  $R_1$ ;

As perdas em carga são medidas a uma temperatura média de enrolamento igual a  $\theta_2$ . As perdas medidas  $P_2$  correspondem à corrente  $I$ . Estas perdas correspondem às “perdas Joule”:  $I^2 R$  e às “perdas suplementares”  $P_{a2}$ :

$$R_2 = R_1 \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} \text{ (cobre)} \quad R_2 = R_1 \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_1} \text{ (alumínio)}$$

$$P_{a2} = P_2 - I^2 R_2$$

À temperatura de referência  $\theta_r$ , a resistência do enrolamento é  $R_r$ , as perdas suplementares  $P_{ar}$  e as perdas totais em carga  $P_r$ :

$$R_r = R_1 \frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_1} \text{ (cobre)} \quad R_r = R_1 \frac{225 + \theta_r}{225 + \theta_1} \text{ (alumínio)}$$

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_r} \quad P_{ar} = P_{a2} \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_r}$$

Para os transformadores imersos em óleo isolante, com temperatura de referência de 75 °C, as fórmulas tornam-se:

$$R_r = R_1 \frac{310}{235 + \theta_1} \quad (\text{cobre}) \qquad R_r = R_1 \frac{300}{225 + \theta_1} \quad (\text{alumínio})$$

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{235 + \theta_2}{310} \qquad P_{ar} = P_{a2} \frac{225 + \theta_2}{300}$$

Finalmente:  $P_r = I^2 R_r + P_{ar}$



## **Anexo E** **(normativo)**

### **Métodos de ensaio**

Enquanto não vigorarem Normas Brasileiras aplicáveis especificamente aos transformadores não abrangidos por esta parte da ABNT NBR 5356 e pelas ABNT NBR 5356-2, ABNT NBR 5356-3, ABNT NBR 5356-4 e ABNT NBR 5356-5 ou a outros transformadores especiais, este método de ensaio pode ser aplicado, no que couber.

Quando, nesta parte da ABNT NBR 5356, for mencionado o termo "óleo", ele se refere tanto ao óleo propriamente dito, quanto a líquidos sintéticos, salvo quando houver distinção expressa.

#### **E.1 Generalidades**

Os ensaios devem ser realizados nas instalações do fabricante, salvo acordo diferente entre este e o comprador, e conforme as recomendações gerais de 11.1.

#### **E.2 Resistência elétrica dos enrolamentos**

**E.2.1** Neste ensaio devem ser registrados:

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

**E.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.

**E.2.3** A corrente utilizada no ensaio não deve ser superior a 15 % da corrente nominal do enrolamento considerado.

**E.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.

**E.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 alimentação no ensaio de elevação de temperatura.

**E.2.6** Deve-se observar que o desligamento da fonte de corrente contínua pode produzir sobretensões consideráveis, podendo danificar os instrumentos de medição.

**E.2.7** Para transformadores secos, a temperatura registrada deve ser a média das leituras de pelo menos três sensores localizados em posições representativas, de preferência dentro dos enrolamentos, por exemplo, em um poço ou canal entre os enrolamentos de alta tensão e baixa tensão. Antes de cada medição o transformador deve permanecer pelo menos 3 h em repouso à temperatura ambiente. A resistência e a temperatura do enrolamento devem ser medidas simultaneamente. A temperatura do enrolamento, medida por termômetro, deve ser aproximadamente igual à do meio circulante.

**E.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 pelo menos 3 h 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.

**E.2.8.1** A temperatura média do óleo é tomada como a média das temperaturas no topo e no fundo do óleo.

**E.2.8.2** Em transformadores de potência nominal igual ou inferior a 5 000 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.

**E.2.8.3** Ao medir a resistência a frio para fins de elevação de temperatura, deve-se tomar cuidado especial para uma determinação precisa da temperatura média do enrolamento. Para isto, a diferença entre as temperaturas do óleo no topo e no fundo deve ser pequena, não devendo ultrapassar 5 °C. Para conseguir-se esta condição mais rapidamente, pode-se fazer circular o óleo por meio de bomba.

**E.2.9** Os valores de resistência, medidos na temperatura do meio circundante, são convertidos para a temperatura de referência estabelecida em 11.1 e conforme o método descrito no Anexo D.

## **E.3 Relação de transformação**

### **E.3.1 Generalidades**

**E.3.1.1** O ensaio de relação de transformação 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.

**E.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.

**E.3.1.3** Os métodos usados para o ensaio de relação de tensões são:

- d) método do voltímetro;
- e) método do transformador-padrão;
- f) método do transformador de referência de relação variável;
- g) método potenciométrico.

### **E.3.2 Método do voltímetro**

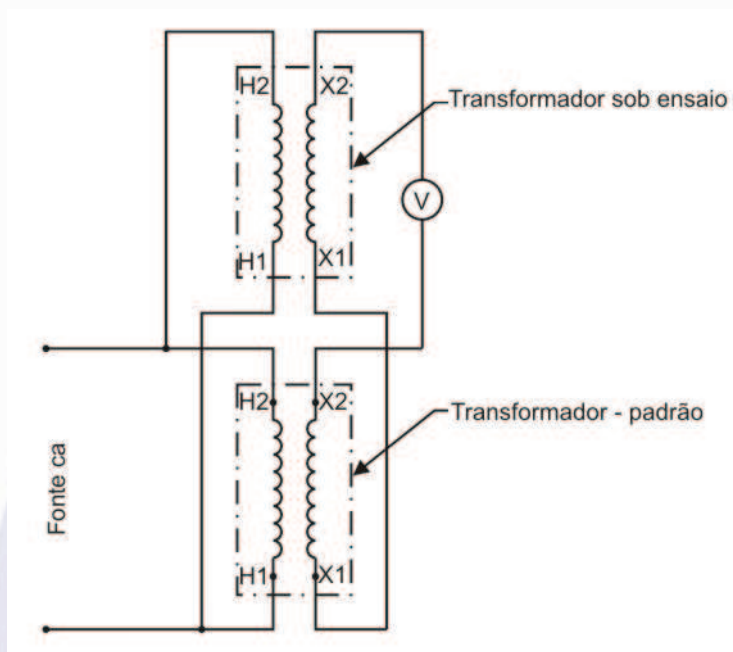
**E.3.2.1** Usar dois voltímetros (com transformadores de potencial, se necessário); um para medir a tensão do enrolamento de alta tensão e o outro para o de baixa tensão. Os dois voltímetros devem ser lidos simultaneamente.

**E.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.

**E.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 E.3.3.

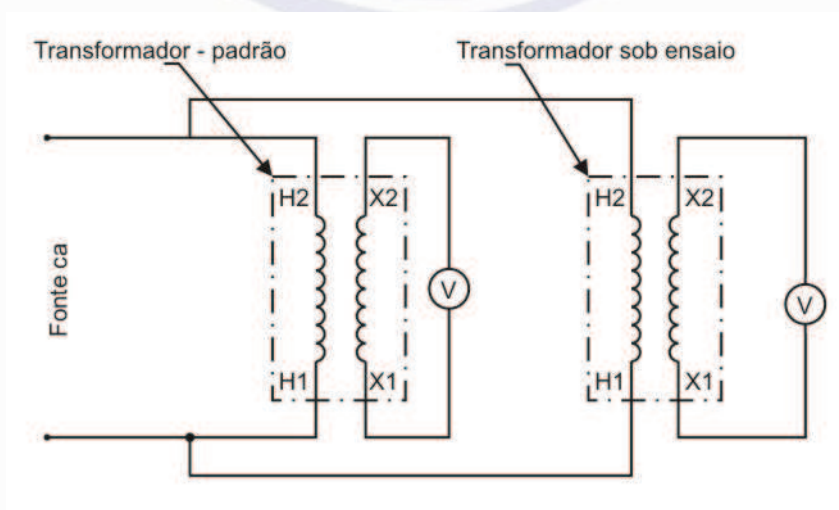
### E.3.3 Método do transformador-padrão

**E.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 E.1, inserindo-se numa das ligações do secundário um voltímetro ou outro dispositivo indicador de tensão. Este indica a diferença de tensão, se houver.



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

**E.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 E.2, 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.



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



### E.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.

### E.3.5 Método potenciométrico

Ligar um resistor de valor adequado, conforme a Figura E.3. 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.

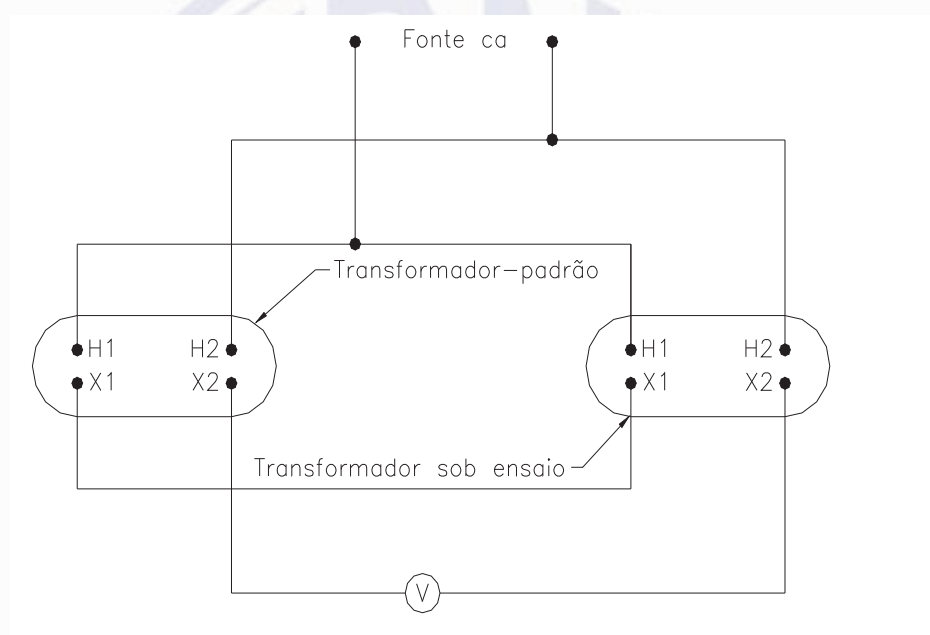


Figura E.3 — Diagrama de ligações para determinação da relação de tensões pelo método potenciométrico

## E.4 Resistência de isolamento

**E.4.1** Medir a resistência de isolamento com um megaohmímetro de 1 000 V no mínimo, para enrolamentos de tensão máxima do equipamento igual ou inferior a 72,5 kV, e de 2 000 V no mínimo, para enrolamentos de tensão máxima do equipamento superior àquela.

**E.4.2** Curto-circuitar os terminais de cada enrolamento do transformador sob ensaio. Fazer as medições nas mesmas ligações indicadas para o ensaio de fator de potência do isolamento (ver E.12.2). Ligar o megaohmímetro, mantendo-se a tensão constante durante no mínimo 1 min e fazer a leitura.

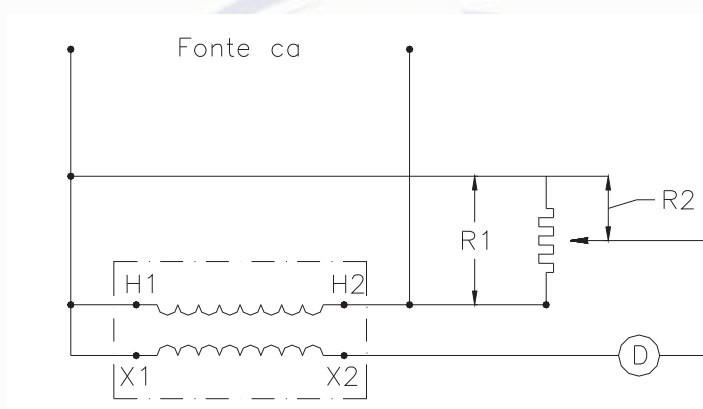
**E.4.3** Anotar nessa leitura a tensão do megaohmímetro utilizado e a temperatura do enrolamento sob ensaio. Para esta última leitura, o transformador deve estar em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente.

## E.5 Polaridade

**E.5.1** Os métodos usados para a verificação da polaridade de transformadores monofásicos são os seguintes:

- método do transformador-padrão;
- método do golpe indutivo de corrente contínua;
- método de corrente alternada;
- método do transformador de referência de relação variável.

**E.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 E.4.



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

**E.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.

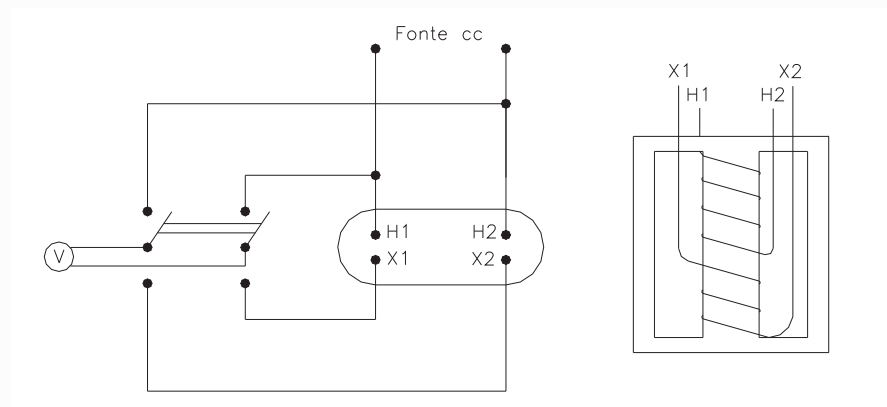
**E.5.2.2** Ligar entre si, na baixa tensão, os terminais da esquerda de quem olha pelo lado da baixa tensão, deixando livres os da direita. Aplicar uma tensão reduzida no enrolamento de alta tensão e medir o valor da tensão entre os dois terminais livres. Se este valor for nulo, ou praticamente nulo, os dois transformadores têm a mesma polaridade.

**E.5.3** Para o método do golpe indutivo com corrente contínua, ligar os terminais de alta tensão a uma fonte de 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 (por exemplo, na Figura 5, 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, 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 E.5). Quando as duas deflexões são no mesmo sentido, a polaridade é aditiva (ver Figura E.6).

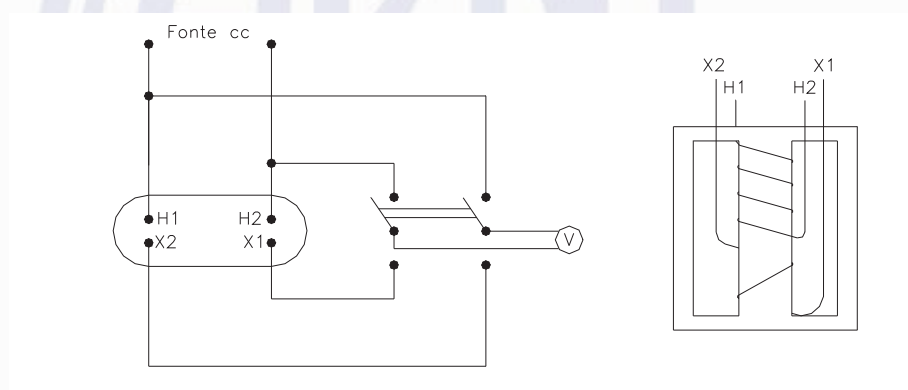
**E.5.4** Para o método de corrente alternada, ligar entre si os terminais adjacentes, um de alta tensão e outro de baixa tensão; os da esquerda, por exemplo (ver Figura E.7).

**E.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 for maior que a segunda, a polaridade é subtrativa; em caso contrário, é aditiva.

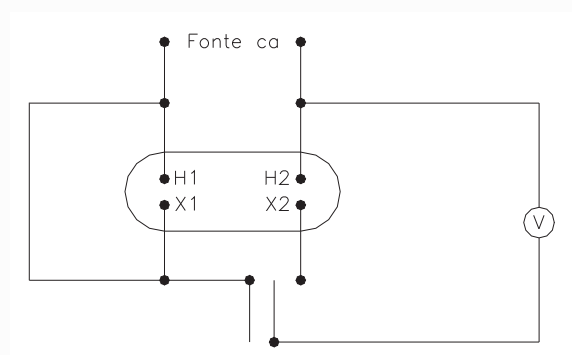
**E.5.4.2** Este método é praticamente limitado a transformadores cuja relação de tensões nominais é no máximo 30:1, para que as diferenças das leituras dos voltímetros possam ser devidamente apreciadas, a não ser que se empreguem transformadores de potencial.



**Figura E.5 — Diagrama de ligações para determinação da polaridade por golpe indutivo, com corrente contínua (polaridade subtrativa)**



**Figura E.6 — Diagrama de ligações para determinação da polaridade por golpe indutivo, com corrente contínua (polaridade aditiva)**



**Figura E.7 — Diagrama de ligações para determinação da polaridade pelo emprego de corrente alternada**

**E.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.

**E.5.6** A polaridade correspondente a cada fase de um transformador polifásico pode ser verificada da mesma forma que para os transformadores monofásicos.

## **E.6 Deslocamento angular**

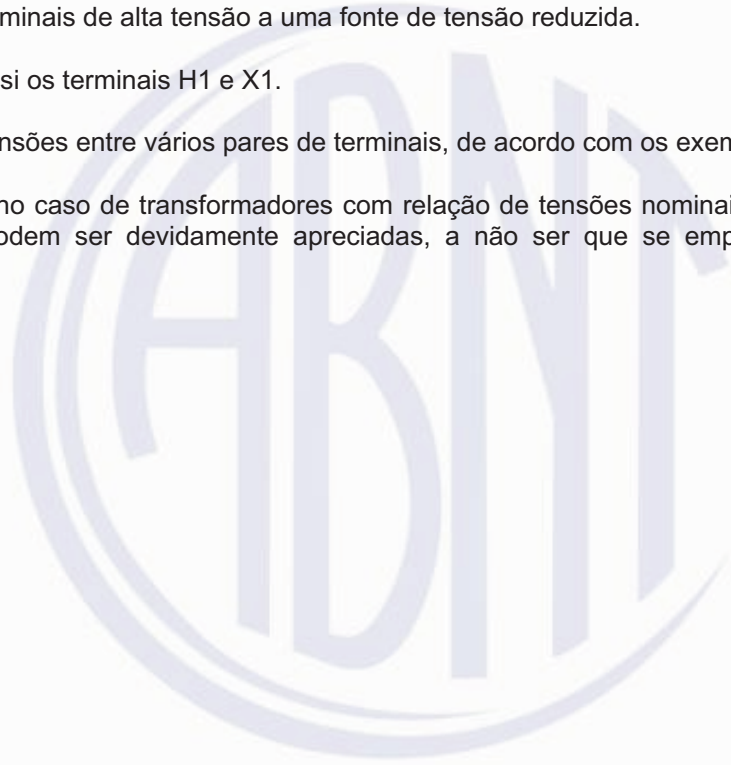
**E.6.1** Este ensaio permite a obtenção dos elementos, para verificação do diagrama fasorial das ligações do transformador.

**E.6.1.1** Ligar os terminais de alta tensão a uma fonte de tensão reduzida.

**E.6.1.2** Ligar entre si os terminais H1 e X1.

**E.6.1.3** Medir as tensões entre vários pares de terminais, de acordo com os exemplos das Figuras E.8 e E.9.

**E.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.



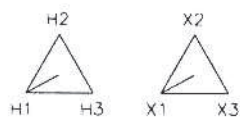
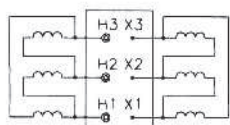
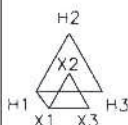
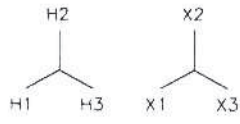
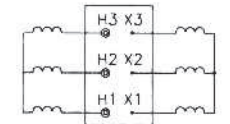
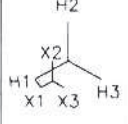
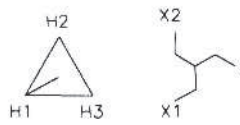
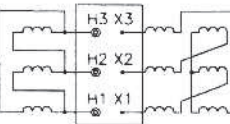
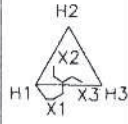
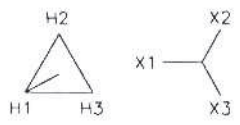
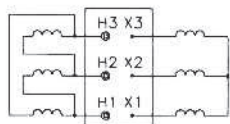
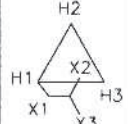
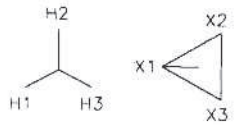
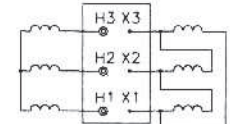
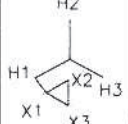
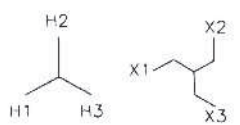
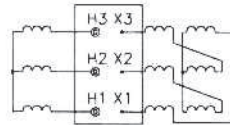
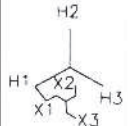
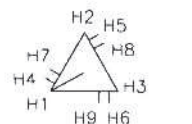
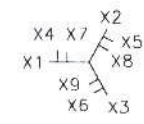
	Deslocamento angular	Diagrama de ligações	Medição de verificação
Grupo 1 – Deslocamento angular 0°	 <p>Ligação triângulo-triângulo</p>		 <p>Ligar-H1 a X1 Medir-H2X2 H3X2; H1H2 H2X3; H3X3</p>
	 <p>Ligação estrela-estrela</p>		 <p>Relações de Tensão (1) <math>H2X3 = H3X2</math> (2) <math>H2X2 &lt; H1H2</math> (3) <math>H2X2 &lt; H2X3</math> (4) <math>H2X2 = H3X3</math></p>
	 <p>Ligação triângulo-ziguezague</p>		
Grupo 2 – Deslocamento angular 30°	 <p>Ligação triângulo-estrela</p>		 <p>Ligar-H1 a X1 Medir-H3X2; H3X3; H1H3 H2X2; H2X3</p>
	 <p>Ligação estrela-triângulo</p>		 <p>Relações de Tensão (1) <math>H2X2 = H3X3</math> (2) <math>H3X2 &lt; H1H3</math> (3) <math>H2X2 &lt; H2X3</math> (4) <math>H2X2 &lt; H1H3</math></p>
	 <p>Ligação estrela-ziguezague</p>		
	 <p>TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM DERIVAÇÃO</p> 		

Figura E.8 — Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais de tensão, para ligações de transformadores trifásicos

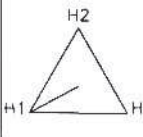
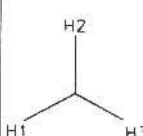
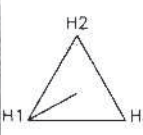
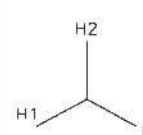
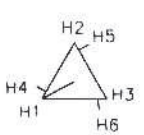
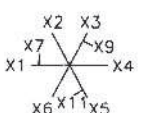
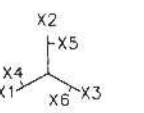
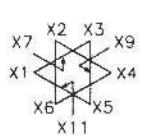
	Deslocamento angular	Medição de verificação
Grupo 1 - Deslocamento angular 0°	 <p>Ligação triângulo-duplo triângulo</p>	<p>Ligar—H1 a X1 a X4 Medir—H2X3; H1H2; H2X3; H2X6; H3X3; H2X2; H2X5; H3X2</p> <p>Relações de tensão</p> <p>(1) H2X5=H3X3 (2) H2X3&lt;H1H2 (3) H2X3&lt;H2X5 (4) H2X6=H3X2 (5) H2X6&gt;H1H2 (6) H2X2&lt;H2X6</p>
	 <p>Ligação estrela-dupla estrela</p>	<p>Ligar—X2 a X4 a X6 H1 a X1 Medir—H2X3; H3X3; H1H2; H2X5</p> <p>Relações de tensão</p> <p>(1) H2X5=H3X3 (2) H2X3&lt;H1H2 (3) H2X3&lt;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; H1H3; H2X3; H2X5</p> <p>Relações de tensão</p> <p>(1) H3X3=H3X5 (2) H3X3&lt;H1H3 (3) H2X3&lt;H2X5</p>
	 <p>Ligação estrela-duplo triângulo</p>	<p>Ligar—H1 a X1 a X4 Medir—H3X3; H3X5; H1H3; H2X3; H2X5; H3X2; H3X6; H2X2; H2X6</p> <p>Relações de tensão</p> <p>(1) H3X3=H3X5 (2) H3X3&lt;H1H3 (3) H2X3&lt;H2X5 (4) H3X2=H3X6 (5) H3X2&gt;H1H3 (6) H2X2&lt;H2X6</p>
Transformador hexafásico com derivação		
   		

Figura E.9 — Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais de tensão, para ligações de transformadores hexafásicos



## E.7 Sequência de fases para transformadores polifásicos

**E.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 de baixa tensão, utilizando uma tensão adequada. Observar, em seguida, o sentido de rotação do dispositivo indicador. O dispositivo indicador deve ser transferido em seguida para o lado de 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.

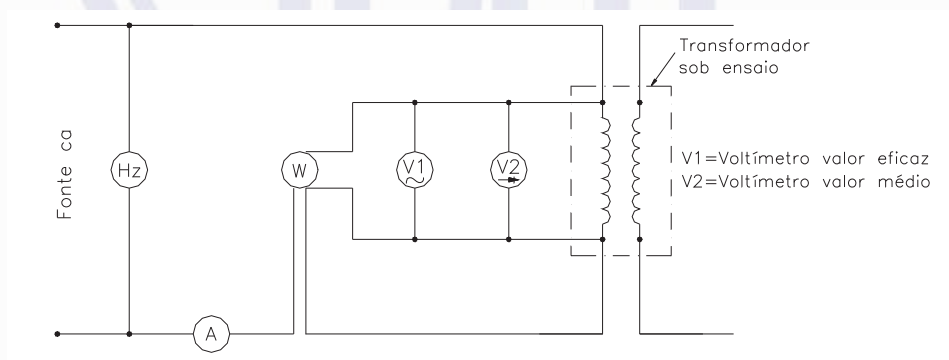
**E.7.2** Excitar novamente o transformador pelo mesmo lado e com tensão adequada, sem se alterarem as ligações de excitação. Observar novamente o sentido da rotação do dispositivo indicador.

**E.7.3** A sequência de fases do transformador está certa quando os sentidos de rotação do dispositivo indicador são os mesmos.

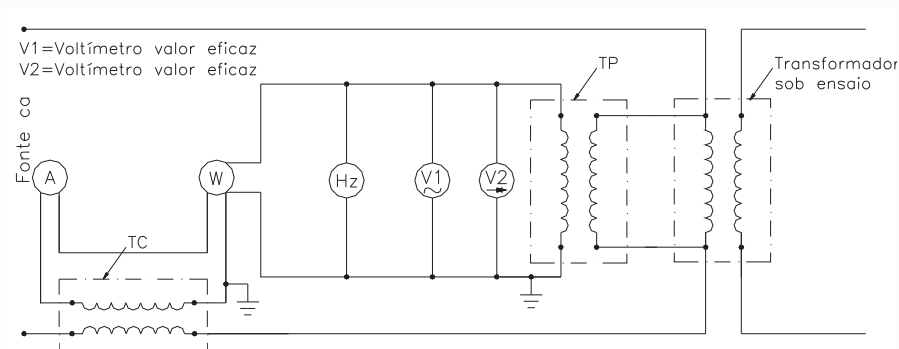
## E.8 Perdas em vazio e corrente de excitação

**E.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 às medições feitas em outras derivações, porém com a respectiva tensão de derivação. As medições devem ser realizadas na frequência nominal.

**E.8.2** As medições das perdas em vazio em transformadores monofásicos são efetuadas ligando-se o transformador de acordo com as Figuras E.10 ou E.11, 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.



**Figura E.10 — Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores monofásicos, sem transformadores para instrumentos**



**Figura E.11 — Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores monofásicos, com transformadores para instrumentos**

**E.8.2.1** A tensão de ensaio deve ser ajustada por um voltímetro que mede o valor médio da tensão, mas que é graduado de modo a fornecer o valor eficaz de uma tensão senoidal com o mesmo valor médio. O valor lido por este voltímetro é  $U'$ .

Simultaneamente, um voltímetro medindo o valor eficaz da tensão deve estar conectado em paralelo com o voltímetro de valor médio e a tensão  $U$  que ele indica deve ser registrada.

Quando um transformador trifásico é ensaiado, as tensões devem ser medidas entre os terminais de fase, se um enrolamento triângulo for energizado, e entre os terminais de fase e neutro, se um enrolamento YN ou ZN for energizado.

A forma de onda da tensão de ensaio é satisfatória se  $U'$  e  $U$  forem iguais com desvio máximo de 3 %.

**NOTA** Sabe-se que as condições mais severas de carga para a exatidão da fonte de tensão de ensaio são geralmente impostas pelos grandes transformadores monofásicos.

As perdas em vazio medidas são  $P_m$  e as perdas em vazio corrigidas são tomadas iguais a:

$$P_o = P_m (1 + d)$$

$$d = \frac{U' - U}{U'} \quad (\text{habitualmente negativo})$$

O valor eficaz da corrente de excitação e o valor das perdas são medidos simultaneamente. Para um transformador trifásico, toma-se a média dos valores das três fases.

**E.8.2.2** Ajustar a frequência e a tensão para o valor nominal, pelo voltímetro de valor médio. Anotar, simultaneamente, os valores de frequência, 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 corresponde 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.

**E.8.2.3** 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 (diferença entre  $U$  e  $U'$  maior do que 3 %), 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 forem 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; para verificação, deve ser obtido um oscilograma de tensão.

**E.8.2.4** As perdas por histerese são função do valor máximo da densidade de fluxo, a qual é função do valor médio da tensão de alimentação ( $V_{\text{méd}}$ ), enquanto as perdas por corrente de Foucault (parasitas) são função do valor eficaz da tensão de alimentação ( $V_{\text{ef}}$ ). 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:

$$W_0 = W_m \frac{100}{W_h\% + kW_f\%} \quad \dots(1)$$

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

Onde:

$W_0$  representa as perdas em vazio para tensão senoidal pura, expresso em watts (W);

$W_m$  representa as perdas em vazio medidas, expressas em watts (W);

$W_h$  representa as perdas por histerese, expressas em porcentagem relativas a  $W_m$ ;

$W_f$  representa as perdas por correntes de Foucault, expressas em porcentagem, relativas a  $W_m$ ;

$V_{\text{ef}}$  é o valor eficaz da tensão de alimentação, lido no voltímetro  $V_1$  (ver Figuras E.10 e E.11), expresso em volts (V);

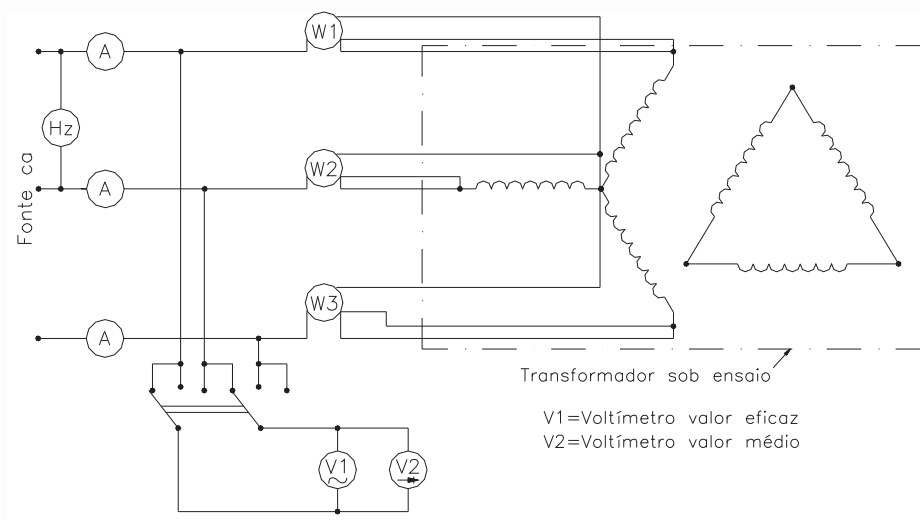
$V_{\text{méd}}$  é o valor médio da tensão de alimentação, lido no voltímetro  $V_2$  (ver Figuras E.10 e E.11), expresso em volts (V).

Os valores de  $W_h$  e  $W_f$  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:

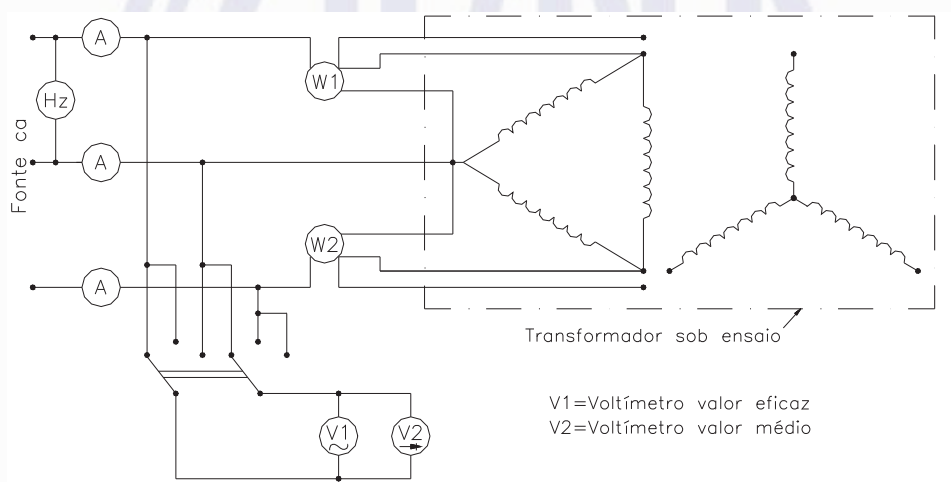
$W_h$	$W_f$
%	%
50	50

**E.8.3** O método descrito em E.4.8.1 para transformadores monofásicos pode ser aplicado aos transformadores trifásicos, com as modificações de E.8.3.1 a E.8.3.4.

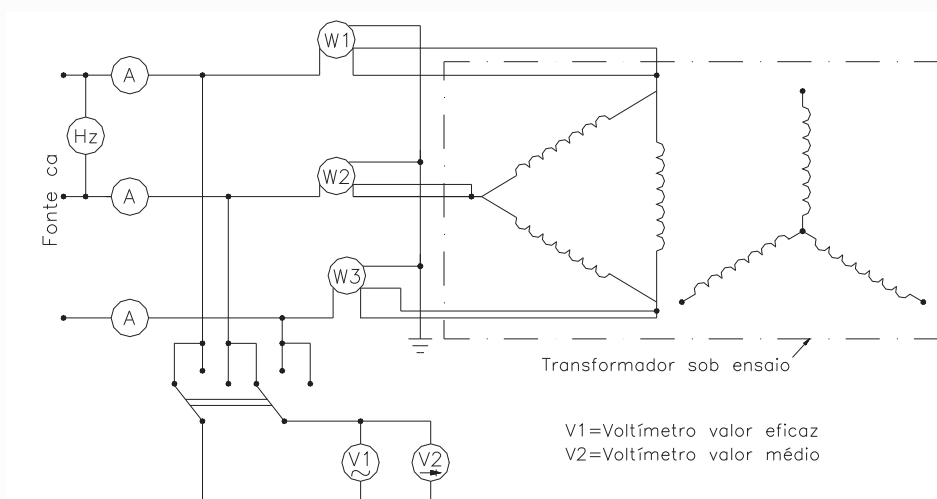
**E.8.3.1** Os instrumentos são ligados de acordo com as Figuras E.12 a E.15.



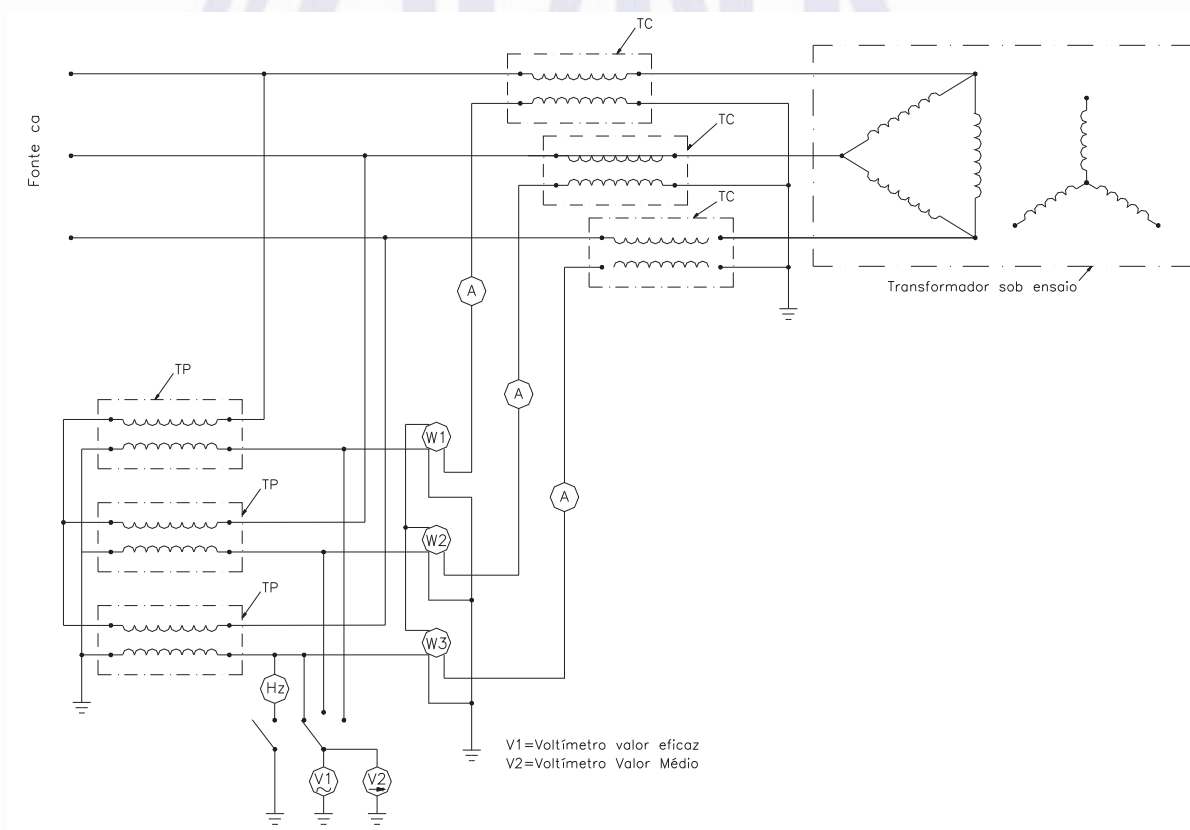
**Figura E.12 — Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação em transformadores trifásicos, pelo método de dois wattímetros**



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



**Figura E.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**

**E.8.3.2** Usar dois wattímetros, de acordo com a Figura E.12, e tomar três pares de leituras separadas, permutando ciclicamente as ligações das fases.

**E.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.

**E.8.3.4** Usar três wattímetros, de acordo com as Figuras E.13 a E.15, e tomar as leituras dos três wattímetros; a soma delas é o valor das perdas em vazio  $W_m$  do transformador, a qual deve ser corrigida como para os transformadores monofásicos.

**E.8.4** Para medição da corrente de excitação, as ligações a serem usadas são indicadas nas Figuras E.10 a E.15, podendo-se retirar os wattímetros do circuito.

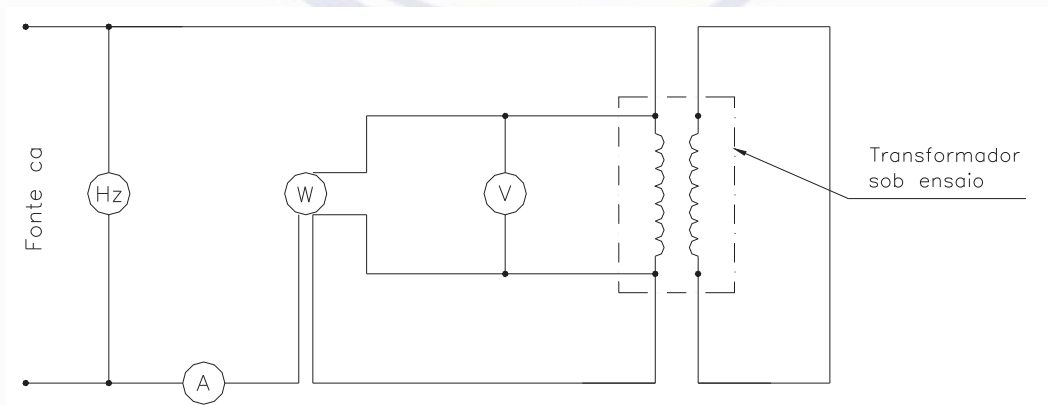
Ajustar a tensão nominal pelo voltímetro de valor eficaz  $V_1$  e fazer a leitura dos amperímetros, sendo  $I_1$  a média destas leituras. Ajustar novamente a tensão nominal pelo voltímetro de valor médio  $V_2$  e fazer a leitura do voltímetro de valor eficaz  $V_1$ . Fazer as leituras dos amperímetros 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 é 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.

## E.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.

### E.9.1 Transformadores monofásicos de dois enrolamentos

**E.9.1.1** Ligar em curto-circuito um dos enrolamentos do transformador (de preferência, e para maior facilidade, o de baixa tensão), de acordo com a Figura E.16. Aplicar ao outro enrolamento uma tensão na frequência nominal e de valor suficiente para nele circular a corrente nominal, exceto nos casos de E.9.5. Esta tensão é a tensão de curto-circuito deste enrolamento ( $e_z$ ).



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

**E.9.1.2** Os condutores utilizados para curto-circuitar o transformador devem ter seção igual ou superior ao dos seus respectivos terminais, e devem ser tão curtos quanto possível e afastados de massas magnéticas.



**E.9.1.3** As medições devem ser executadas rapidamente a intervalos suficientes, para a elevação de temperatura não causar erros significativos.

**E.9.1.4** Tomar leituras simultâneas da corrente, da tensão aplicada ao enrolamento e da potência absorvida pelo transformador em curto-circuito.

**E.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.

NOTA 1 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.

NOTA 2 A correção da potência absorvida pelo transformador também pode ser obtida por cálculo, partindo-se das resistências e demais parâmetros dos instrumentos usados.

**E.9.1.6** A potência realmente absorvida pelo transformador ( $W_E$ ) à temperatura de ensaio é igual à diferença entre a potência aparente absorvida ( $W_1$ ) e a potência devida à carga dos instrumentos ( $W_0$ ), isto é:

$$W_E = W_1 - W_0$$

**E.9.1.7** A temperatura dos enrolamentos deve ser determinada antes e depois do ensaio, de acordo com o prescrito em E.2. A média aritmética das duas leituras deve ser considerada como a temperatura do ensaio ( $\theta$ ).

**E.9.1.8** Para se obterem as perdas em carga na temperatura de referência ( $\theta_r$ ), as perdas devem ser corrigidas pelo método de correção de temperatura descrito no Anexo D.

**E.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:

$z$  é a impedância de curto-circuito, referida ao enrolamento sob tensão, expressa em ohms ( $\Omega$ );

$e_z$  é a tensão de curto-circuito do enrolamento sob tensão, expressa em volts (V);

$I_n$  é a corrente nominal do enrolamento, expressa em ampères (A);

$r$  é a componente resistiva, expressa em ohms ( $\Omega$ );

$W_E$  é a potência realmente absorvida pelo transformador;

$x$  é a componente reativa, expressa em ohms ( $\Omega$ ).

**E.9.1.10** A impedância de curto-circuito é geralmente expressa em porcentagem. Neste caso, seu valor é idêntico ao da tensão de curto-circuito, em porcentagem, sendo determinado pelas fórmulas:

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

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

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

onde:

$V_n$  é a tensão nominal do enrolamento, expressa em volts (V);

$P_n$  é a potência nominal do enrolamento, expressa em volt-ampères (VA).

**E.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  $\theta$  para outra temperatura de referência  $\theta$ , calcula-se o novo valor da componente resistiva através das fórmulas:

$$r' = \frac{W'_E}{I_n^2} \quad \text{ou} \quad r'\% = \frac{W'_E}{P_n} \times 100$$

onde  $W'_E$  são as perdas corrigidas para a temperatura de referência.

A impedância de curto-circuito, na temperatura  $\theta$ , é, então, calculada pelas fórmulas:

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

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

## E.9.2 Transformadores trifásicos de dois enrolamentos

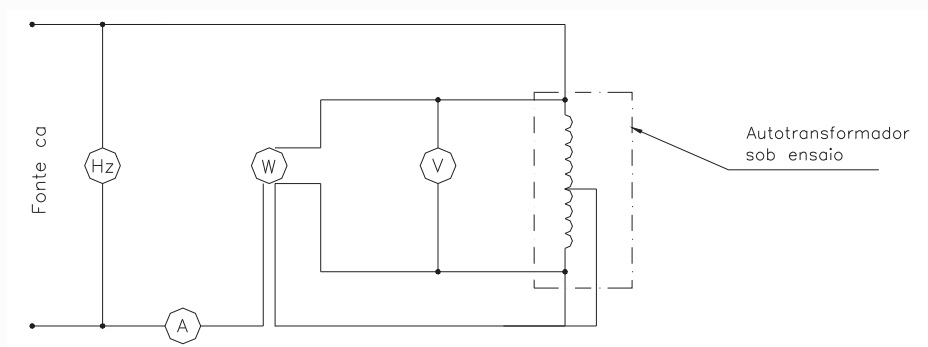
**E.9.2.1** Ligar em curto-circuito os três terminais de alta tensão ou os de baixa tensão, de acordo com a Figura E.17. Ligar os outros três terminais a uma fonte trifásica de tensões simétricas, na frequência nominal do transformador e de valor suficiente para nele circular a corrente nominal, exceto nos casos de E.9.5. Esta tensão é a tensão de curto-circuito deste enrolamento ( $e_z$ ).

**E.9.2.2** O procedimento subsequente para execução do ensaio e determinação dos valores é análogo ao indicado para transformadores monofásicos de dois enrolamentos.

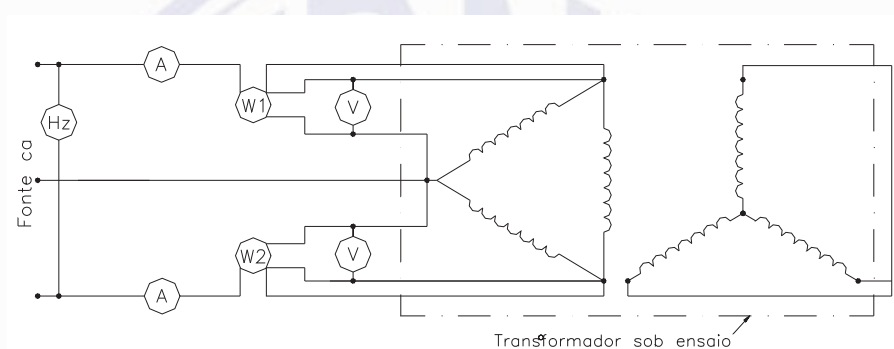
## E.9.3 Autotransformadores monofásicos e trifásicos

**E.9.3.1** Os enrolamentos série e comum dos autotransformadores devem ser tratados como enrolamentos separados.

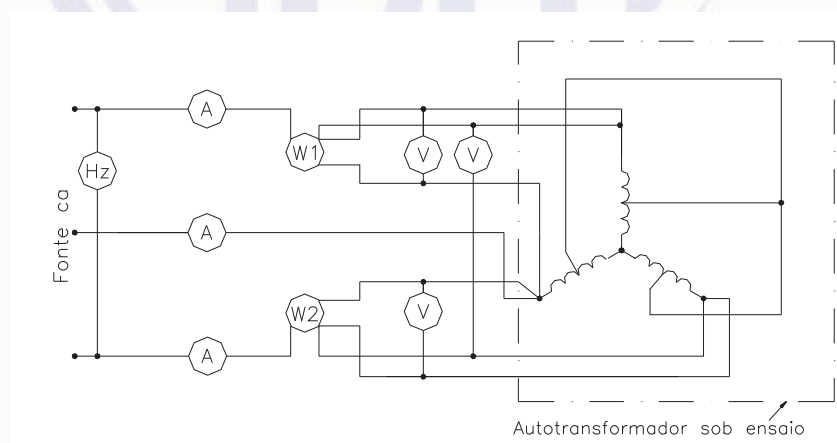
**E.9.3.2** Fazer as ligações de acordo com as Figuras E.18 e E.19 e proceder analogamente para os transformadores de dois enrolamentos.



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



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



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

### E.9.4 Transformadores de três enrolamentos e autotransformadores com terciário

**E.9.4.1** Em um transformador de três enrolamentos, monofásico ou trifásico, 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  $e_z$ ). A maneira de proceder é igual à empregada para transformadores monofásicos de dois enrolamentos. Se as potências dos diferentes enrolamentos não forem 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 a do enrolamento de maior potência.

**E.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  $z_{31}$  são os valores das impedâncias calculadas para cada combinação de enrolamentos, a partir das tensões de curto-circuito respectivas, por unidade na base da potência nominal do enrolamento respectivo.

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

**E.9.4.3** A maneira de proceder quanto à correção devida à temperatura é a mesma prescrita para transformadores de monofásicos de dois enrolamentos.

**E.9.4.4** A perda em carga para transformadores 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 como segue:

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

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

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

onde:

$P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  são as potências de referência, em volt-ampères (VA) e, dos enrolamentos 1, 2 e 3 para determinada condição de carregamento especificada ou para as respectivas potências nominais dos enrolamentos;

$W_{12}$  é a perda dos enrolamentos 1 e 2, referida à potência  $P_2$ , na temperatura de referência, expressa em watts (W);

$W_{13}$  é a perda dos enrolamentos 1 e 3, referida à potência  $P_3$ , na temperatura de referência, expressa em watts (W);

$W_{23}$  é a perda dos enrolamentos 2 e 3, referida à potência  $P_3$ ; na temperatura de referência, expressa em watts (W);

$W_1$ ,  $W_2$  e  $W_3$  são as perdas nos enrolamentos 1, 2 e 3, referidas às potências  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , respectivamente, na temperatura de referência, expressas em watts (W).

Em um 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.

**E.9.4.5** 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.

## **E.9.5 Ensaios com corrente reduzida**

**E.9.5.1** Nos casos em que não for possível realizar os ensaios com corrente nominal, estes podem ser realizados com uma corrente reduzida de valor pelo menos igual a 50 % da corrente nominal.

**E.9.5.2** 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.

**E.9.5.3** 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.

**E.9.5.4** Os valores de impedância de curto-circuito e de perdas, determinados desta forma, devem ser corrigidos para uma outra temperatura de referência  $\theta'$ , conforme prescrições das seções anteriores.

## **E.10 Ensaios dielétricos**

Estes ensaios devem ser realizados de acordo com as ABNT NBR 5356-3, ABNT NBR 6936 e ABNT NBR 6937.

### **E.10.1.1 Tensão suportável nominal à frequência industrial (tensão aplicada)**

Este ensaio deve ser realizado conforme Seção 11 da ABNT NBR 5356-3:2007.

**E.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.

**E.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.

**E.10.1.3** 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.

**E.10.1.4** Para transformadores com enrolamentos inacessíveis, o procedimento de ensaio deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

#### **E.10.1.2 Tensão induzida**

#### **E.10.1.3 Ensaio de tensão induzida de curta duração (CACD) para transformadores com enrolamento de alta tensão isolado uniformemente**

##### **E.10.1.3.1 Transformadores com $U_m < 72,5$ kV**

Este ensaio deve ser realizado conforme 12.2.1 da ABNT NBR 5356-3:2007.

##### **E.10.1.3.2 Transformadores com $U_m \geq 72,5$ kV**

Este ensaio deve ser realizado conforme 12.2.2 da ABNT NBR 5356-3:2007.

#### **E.10.1.4 Ensaio de tensão induzida de curta duração fase-terra (CACD), fase-terra para transformadores com enrolamento de alta tensão com isolamento progressivo**

Este ensaio deve ser realizado conforme 12.3 da ABNT NBR 5356-3:2007.

##### **E.10.1.4.1 Ensaio de tensão induzida de longa duração (CALD) para transformadores com enrolamento de alta tensão com isolamento progressivo ou uniforme**

Este ensaio deve ser realizado conforme 12.4 da ABNT NBR 5356-3:2007.

#### **E.10.1.5 Descargas parciais – Disposições gerais**

O método para medição de descargas parciais é a medição em picocoulombs, conforme Anexo A da ABNT NBR 5356-3:2007.

#### **E.10.2 Tensão suportável nominal ao impulso atmosférico**

Este ensaio deve ser realizado conforme a Seção 13 da ABNT NBR 5356-3:2007.

#### **E.10.3 Tensão suportável nominal ao impulso atmosférico de onda cortada**

Este ensaio deve ser realizado conforme a Seção 14 da ABNT NBR 5356-3:2007.

#### **E.10.4 Impulso de manobra**

Este ensaio deve ser realizado conforme a Seção 15 da ABNT NBR 5356-3:2007.

### **E.11 Estanqueidade e resistência à pressão interna e estanqueidade a quente**

#### **E.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 em 11.10, interromper a entrada do gás, fechando a válvula no tubo de fornecimento. Esta pressão deve manter-se constante durante o tempo de aplicação especificado em 11.10.



### E.11.2 Ensaio a quente (transformadores subterrâneos)

O transformador deve estar completamente montado, com o óleo em seu nível normal e com todos os seus acessórios instalados. Inicialmente deve ser aplicada uma pressão de 0,02 MPa ou conforme especificação, por meio de nitrogênio seco agindo sobre a superfície do óleo, lida num manômetro instalado entre a válvula de admissão do nitrogênio e o transformador.

Com o enrolamento secundário ligado em curto-circuito, aplicar ao enrolamento primário uma tensão suficiente para fazer circular a corrente nominal durante um período consecutivo de 8 h. Neste período a pressão não deve ultrapassar o limite especificado em 11.10.1 e não deve apresentar vazamentos.

## E.12 Fator de potência do isolamento

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

**E.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.

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:

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

**E.12.2** As medições devem ser realizadas de acordo com a Tabela E.1.

**E.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 E.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:

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

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

**E.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.

**Tabela E.1 — Ligações para ensaio 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 ET	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 E.2 — Fatores de correção

Temperatura de ensaio °C	Fator de correção <i>k</i>
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

### E.13 Elevação de temperatura

Este ensaio deve ser realizado conforme a ABNT NBR 5356-2.

### E.14 Ensaio de curto-circuito

Este ensaio deve ser realizado conforme a ABNT NBR 5356-5.

### E.15 Medição da impedância de seqüência zero

O ensaio deve ser realizado conforme 11.7. 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. Em transformadores com núcleo envolvente, a impedância de seqüência zero é igual à impedância de seqüência positiva, sendo, portanto, desnecessário efetuar a medição. Os circuitos usuais para ensaio de medição de impedância de seqüência zero, para transformadores de núcleo envolvido, são descritos em E.15.1 a E.15.3.

#### E.15.1 Transformadores com dois enrolamentos

##### E.15.1.1 Ligação triângulo-triângulo Dd

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

### E.15.1.2 Ligação triângulo-estrela ou estrela-triângulo, respectivamente Dy ou Yd

#### E.15.1.2.1 Neutro não aterrado

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

#### E.15.1.2.2 Neutro aterrado

Neste caso, apenas uma medição é necessária para estabelecer a impedância de seqüência zero. A ligação a ser utilizada neste ensaio é mostrada nas Figuras E.20-a) e E.20-b).

O valor de  $Z_0$  é dado por  $Z_0 = \frac{3 \times U}{I}$

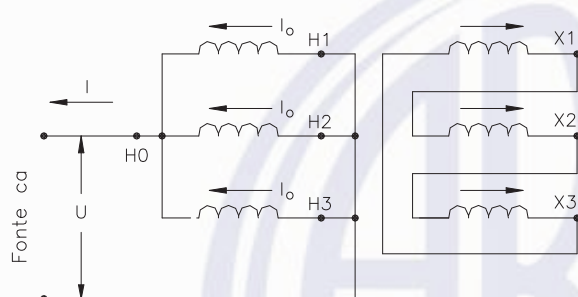


Figura E.20-a) – Transformadores com dois enrolamentos com neutro aterrado – Ligação do circuito de ensaio em triângulo-estrela ou estrela-triângulo

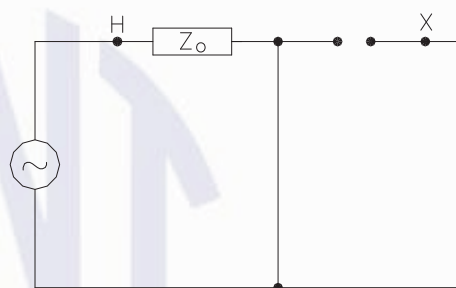


Figura E.20-b) – Circuito equivalente ao da Figura E.20-a)

Figura E.20 — Transformadores com dois enrolamentos com neutro aterrado – Ligação do circuito de ensaio em triângulo-estrela ou estrela-triângulo

### E.15.1.3 Ligação estrela-estrela Yy

#### E.15.1.3.1 Um neutro não aterrado

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

#### E.15.1.3.2 Ambos os neutros aterrados

Neste caso, apenas uma medição é necessária para estabelecer a impedância de seqüência zero. A ligação a ser utilizada neste ensaio é mostrada nas Figuras E.21-a) e E.21-b).

O valor de  $Z_0$  é dado por  $Z_0 = \frac{3 \times U}{I}$

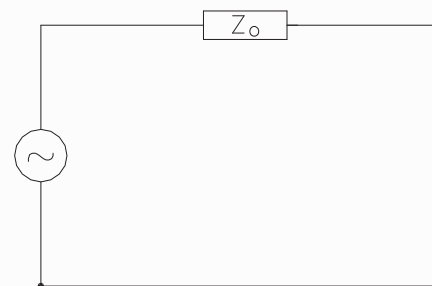
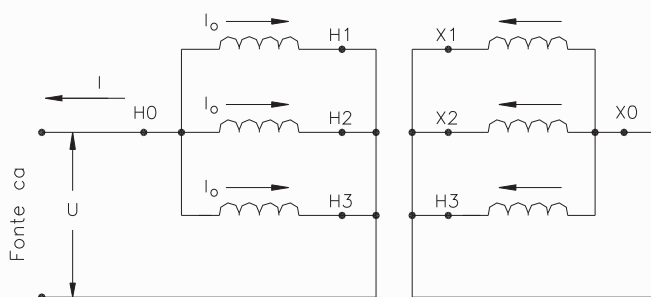


Figura E.21-a) – Transformadores com dois enrolamentos com neutros aterrados – Ligação do circuito de ensaio em estrela-estrela

Figura E.21-b) – Circuito equivalente ao da Figura E.21-a)

Figura E.21 — Transformadores com dois enrolamentos com neutros aterrados – Ligação do circuito de ensaio em estrela-estrela

#### E.15.1.4 Transformadores com enrolamento ligado em zigzague

##### E.15.1.4.1 Transformador de aterramento

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 E.22-a) e E.22-b). 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:  $Z_0 = \frac{3 \times U}{I}$

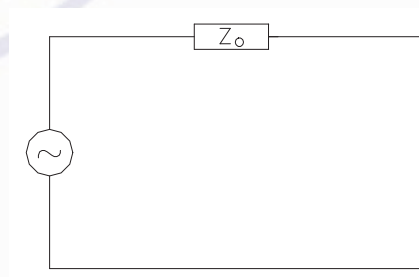
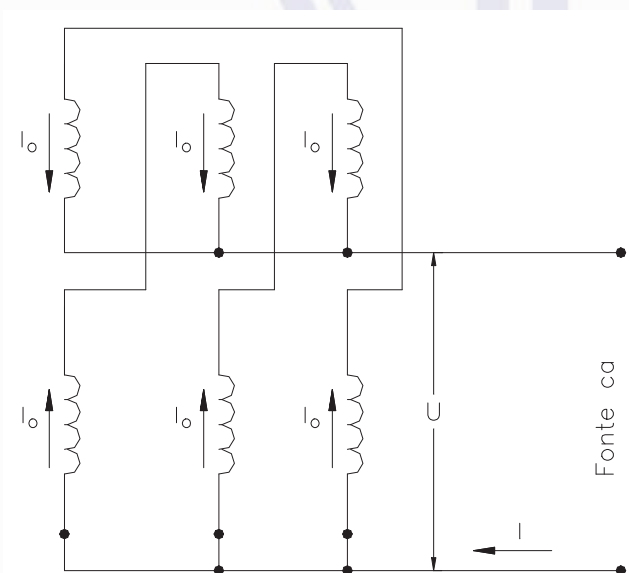


Figura E.22-a) – Transformador com dois enrolamentos – Ligação do circuito de ensaio em zigzague

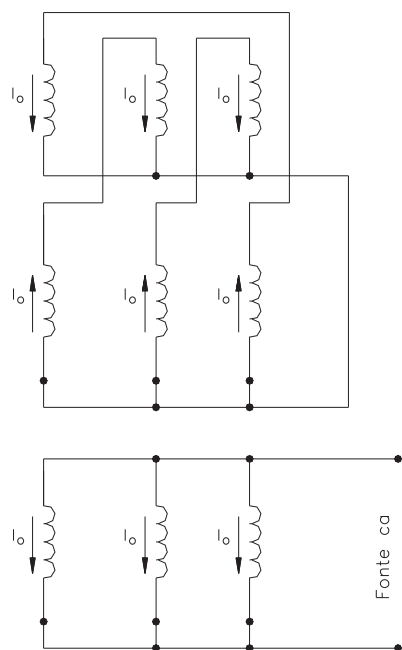
Figura E.22-b) – Circuito equivalente ao da Figura 22a)

Figura E.22 — Transformador com dois enrolamentos – Ligação do circuito de ensaio em zigzague

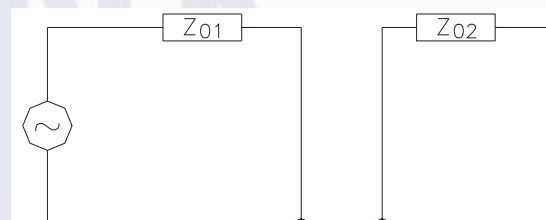
### E.15.1.4.2 Ligação estrela-zigzag ou zigzag-estrela

**E.15.1.4.2.1** Em ligação estrela com neutro não aterrado, basta efetuar apenas uma medição idêntica à descrita em E.15.1.4.1.

**E.15.1.4.2.2** Em ligação estrela com neutro aterrado, é necessário efetuar duas medições, conforme mostrado nas Figuras E.22-a), E.22-b), E.23-a) e E.23-b). A primeira medição corresponde à medição da impedância do enrolamento ligado em zigzag, sendo empregado o circuito das Figuras E.22-a) e E.22-b). A segunda ligação corresponde à medição da impedância do enrolamento ligado em estrela. O circuito de ensaio a utilizar é mostrado nas Figuras E.23-a) e E.23-b).



**Figura E.23a – Transformadores com dois enrolamentos – Ligação do circuito de ensaio em estrela-zigzag ou zigzag-estrela**



**Figura E.23-b – Circuito equivalente ao da Figura 23a**

**Figura E.23 — Transformadores com dois enrolamentos – Ligação do circuito de ensaio em estrela-zigzag ou zigzag-estrela**

## E.15.2 Transformadores com mais de dois enrolamentos

Transformadores com mais de dois enrolamentos apresentam mais de um caminho para a corrente de sequência 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.

### E.15.2.1 Ligação estrela-estrela-triângulo Yyd

**E.15.2.1.1** Neste caso, o circuito equivalente é um circuito em ligação T, cujos três ramos são as incógnitas, conforme mostrado nas Figuras E.24, E.25-a), E.25-b), E.26-a), E.26-b), E.27-a) e E.27-b). 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:

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

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

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

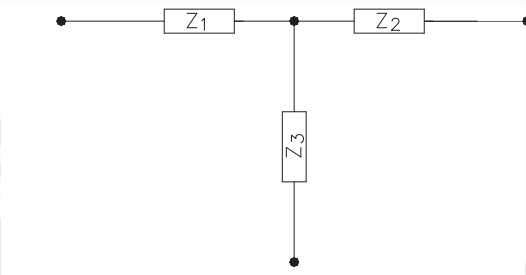


Figura E.24 — Circuito equivalente para transformadores de três enrolamentos

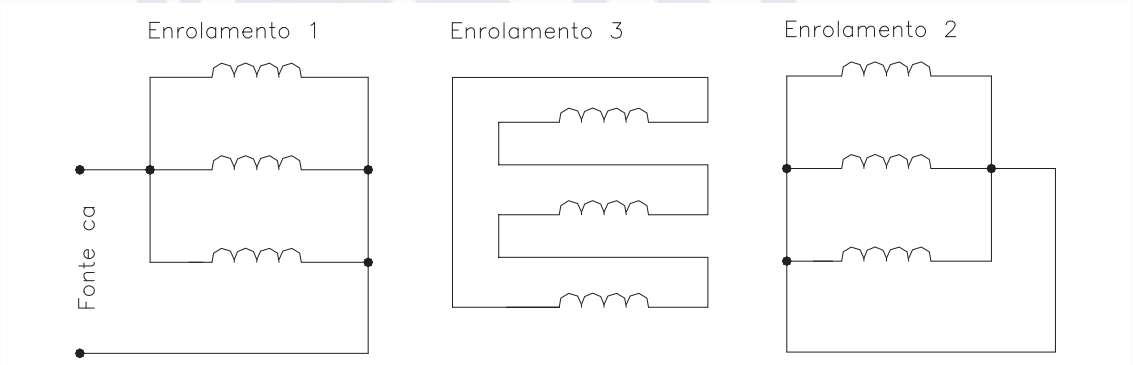


Figura E.25-a) – Ligação do circuito de ensaio para medição de  $Z_{12}$

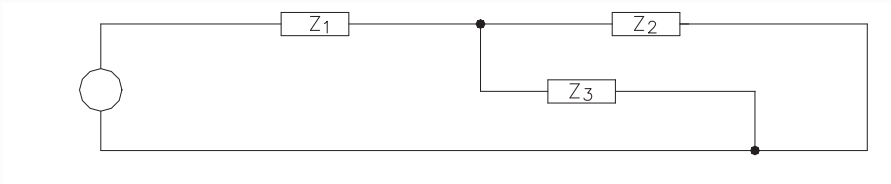


Figura E.25-b) – Circuito equivalente ao da Figura E.25-a)

Figura E.25 — Ligação do circuito de ensaio para medição de  $Z_{12}$

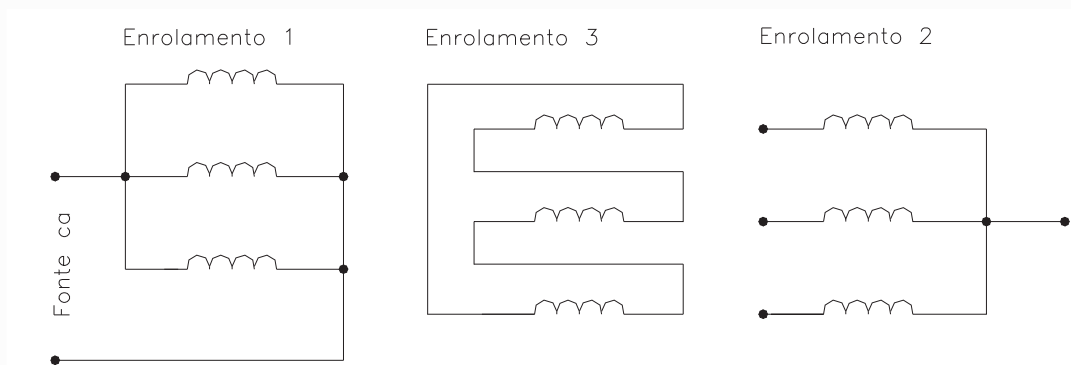


Figura E.26-a) – Ligação do circuito de ensaio para medição de  $Z_{13}$

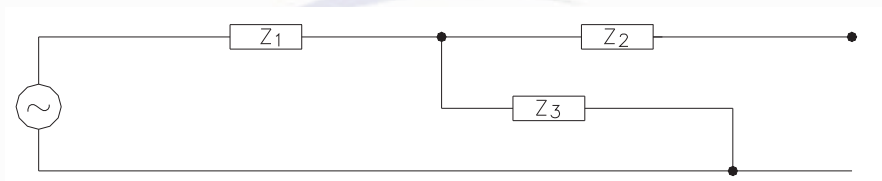


Figura E.26-b) – Circuito equivalente ao da Figura E.26-a)

Figura E.26 — Ligação do circuito de ensaio para medição de  $Z_{13}$

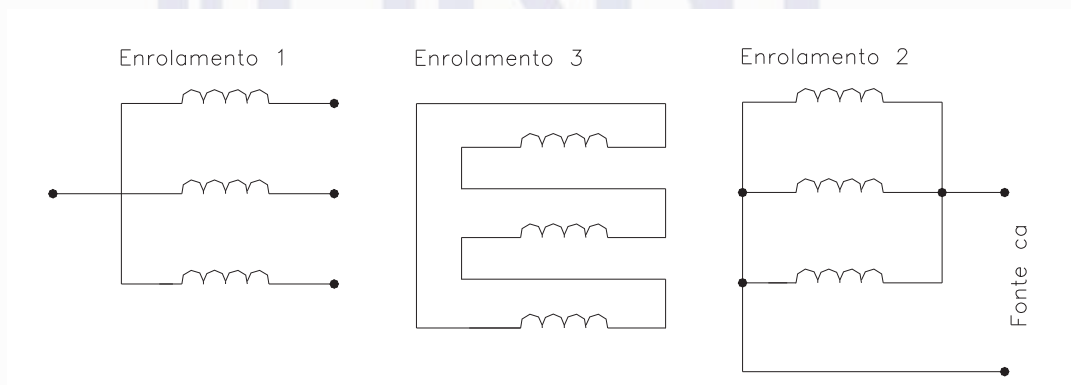


Figura E.27a) – Ligação do circuito de ensaio para medição de  $Z_{23}$

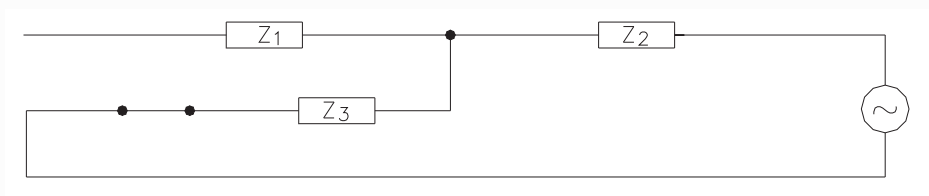


Figura E.27-b) – Circuito equivalente ao da Figura E.27-a)

Figura E.27 — Ligação do circuito de ensaio para medição de  $Z_{23}$

**E.15.2.3** O princípio anteriormente exposto é aplicável para medição das impedâncias de seqüência zero em transformadores com qualquer combinação de ligações de enrolamentos.

### E.15.3 Apresentação dos resultados

Como mostrado em E.15.2, 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 em ohms por fase, é conveniente utilizar valores por unidade para os cálculos. A conversão entre valores absolutos por unidade é feita da seguinte forma:

$$Z_{(pu)} = \frac{Z}{Z_b} \quad \text{Sendo} \quad Z_b = \frac{V_b^2}{P_b} \quad Z_b = \text{Impedância-base}$$

onde:

$V_b$  é a tensão-base;

$P_b$  é a potência-base.

## E.16 Acessórios

### E.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.

### E.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.

### E.16.3 Relé detector de gás tipo Buchholz ou equivalente – Verificação da atuação dos contatos

**E.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.

**E.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.

**E.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.

### E.16.4 Indicador de temperatura do enrolamento

**E.16.4.1** Aplicar as prescrições de E.16.2 para a verificação da escala e operação dos contatos.

**E.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.

### E.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.

### E.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 o balanceamento da hélice.

### E.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.

### E.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.

### E.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.

### E.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) 10 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 devem ocorrer falhas.

## E.17 Medição do nível de ruído

Esta medição deve ser realizada conforme a ABNT NBR 7277.

### **E.18 Medição de harmônicos na corrente de excitação**

Esta medição é considerada ensaio especial e deve ser realizada em comum acordo entre fabricante e comprador.

### **E.19 Medição da potência absorvida pelos motores de bombas de óleo e ventiladores**

Esta medição é considerada ensaio especial e deve ser realizada em comum acordo entre fabricante e comprador.

### **E.20 Medição de resposta em frequência e impedância terminal**

Esta medição é considerada ensaio especial e deve ser realizada em comum acordo entre fabricante e comprador.

#### **E.20.1 Medição da resposta em frequência**

Mede-se a relação de transformação do transformador de potência na faixa de frequência, de pelo menos entre 20 Hz a 1 MHz, aplicando-se uma tensão senoidal de 5 V a 10 V a um dos enrolamentos do transformador e medindo-se a transferência desta tensão para o outro enrolamento. O método de medição deve ser objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

#### **E.20.2 Medição da impedância terminal**

Mede-se a impedância nos terminais do transformador de potência na faixa de frequência, de pelo menos entre 20 Hz a 1 MHz, com aproximadamente 200 pontos de medição. O método de medição deve ser objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

### **E.21 Ensaio do grau de polimerização do papel**

O ensaio do grau de polimerização do papel deve ser realizado conforme ABNT NBR 8148.

### **E.22 Medição do ponto de orvalho**

Esta medição é considerada ensaio especial e os parâmetros de ensaio devem constituir objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

### **E.23 Levantamento da curva de magnetização e medição da reatância em núcleo de ar**

Esta medição é considerada ensaio especial e os parâmetros de ensaio devem constituir objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

### **E.24 Medição dos gases dissolvidos no óleo isolante**

Esta medição deve ser realizada de acordo com a ABNT NBR 7070.

### **E.25 Medição do nível de tensão de radiointerferência**

Esta medição deve ser realizada conforme a CISPR 16.

## E.26 Ensaios de verificação da pintura externa e interna de transformadores

### E.26.1 Espessura

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

### E.26.2 Aderência

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

### E.26.3 Outros ensaios

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

### E.26.4 Umidade

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

### E.26.5 Impermeabilidade

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

### E.26.6 Brisa marítima

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

## E.27 Regulação e rendimento

### E.27.1 Regulação

**E.27.1.1** 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:

para carga indutiva:

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

para carga capacitiva:

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

onde:

$p$  é o fator de potência da carga;

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

$$r = \frac{r\%}{100} \quad (\text{ver E.9.1.10})$$

$$x = \frac{x\%}{100} \quad (\text{ver E.9.1.10})$$

**NOTA** Para obter a regulação percentual, multiplica-se os valores obtidos pelas equações (1) e (2) por 100.



**E.27.1.2** Maiores informações sobre cálculo da regulação com maior grau de precisão e cálculo para transformadores de três enrolamentos podem ser encontradas na ABNT NBR 8153.

## E.27.2 Rendimento

O rendimento é calculado pela equação:

$$N = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}} = \frac{\text{saída} - \text{perdas}}{\text{entrada}} = 1 - \frac{\text{perdas}}{\text{entrada}} = 1 - \frac{\text{saída}}{\text{saídas} + \text{perdas}} = 1 - \frac{W}{P + W}$$

onde:

$N$  é o rendimento;

$W$  representa as perdas totais, expressas em quilowatts (kW), correspondentes à potência fornecida pelo transformador, determinadas pela soma das perdas em vazio e das perdas em carga, à temperatura considerada;

$P$  é a potência fornecida pelo transformador, expressa em quilowatts (kW).

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

## E.28 Ensaio de vácuo interno

Em cada uma das quatro paredes principais do tanque é instalada uma referência para medição do deslocamento residual. Esta referência pode ser um fio de prumo suspenso de uma haste fixada à moldura superior do tanque, pode ser um pedestal disposto sobre o piso ao lado da parede a ser medida ou outra referência que seja adequada a esta medição. A referência é colocada no ponto onde se espera o máximo deslocamento, normalmente no centro do painel mais central.

Antes da aplicação do vácuo devem ser medidas as distâncias entre pontos previamente assinalados no tanque e suas referências.

O transformador deve estar sem óleo, com a parte ativa no interior do tanque e livre de acessórios que possam interferir com os dispositivos de medição, para então ser submetido ao vácuo com os níveis de pressão e duração especificados em 11.15.

A pressão atmosférica deve ser então restabelecida, normalmente mediante admissão de N<sub>2</sub> ou ar, secos.

Com o tanque novamente à pressão atmosférica, medir a distância dos mesmos pontos às suas referências e determinar os deslocamentos residuais, ou seja, as diferenças entre estas medidas e as primeiras.

Os deslocamentos residuais não devem exceder o limite estipulado em 11.15.