



## Capítulo I

# Princípios básicos de transformadores de potência

Por Marcelo Paulino\*

Em 1885, George Westinghouse Jr. compra os direitos da patente de Goulard-Gibbs para construir transformadores de corrente alternada e encarrega William Stanley dessa tarefa. Stanley desenvolveu o primeiro modelo comercial do que, naquele momento, nomeou-se de transformador. O transformador possibilitava a elevação das tensões diminuindo as perdas na transmissão de energia elétrica, permitida pelo uso da corrente alternada, ao contrário da corrente contínua de Edison.

O transformador é um equipamento elétrico, sem partes necessariamente em movimento, que transfere energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário, terciário), alterando os valores de tensões e correntes em um circuito de corrente alternada, ou modificar os valores de impedância do circuito elétrico, sem alterar a frequência do sistema. A necessidade da utilização de baixos níveis de tensão no consumidor e a necessidade de transmitir energia elétrica com tensões elevadas tornam muito importante o papel desempenhado pelo transformador de potência.

Os transformadores representam o ativo mais caro da cadeia que conecta a geração até os pontos de utilização de energia elétrica. Atualmente,

com a pressão imposta pelas necessidades técnicas e comerciais, como as condições de um mercado de energia livre ou pelos esforços em manter o fornecimento de energia com qualidade a todos os seus clientes, aumentam as abordagens de uma manutenção baseada nas condições do equipamento.

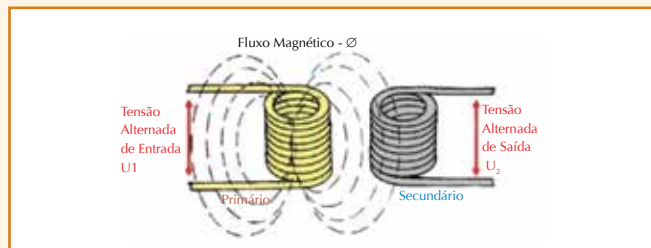
As equipes envolvidas com comissionamento e manutenção têm sofrido crescente pressão para reduzir custos, mesmo sendo forçadas a manter antigas instalações em operação por tanto tempo quanto possível. Os equipamentos elétricos instalados em subestações podem ser solicitados a operar sob diversas condições adversas, tais como: altas temperaturas, chuvas, poluição, sobrecarga e, dessa forma, mesmo tendo uma operação e manutenção de qualidade, não se pode descartar a possibilidade de ocorrerem falhas que deixem indisponíveis as funções de transmissão e distribuição de energia elétrica aos quais pertencem.

Entretanto, a checagem regular das condições de operação desses equipamentos torna-se cada vez mais importante. Torna-se imperativa a busca de procedimentos e de ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de forma rápida e precisa. Portanto, para

subsidiar os artigos futuros sobre aspectos e procedimentos de manutenção, o presente texto apresenta os princípios básicos de funcionamento de transformadores de potência.

### **Princípio de funcionamento do transformador monofásico**

O transformador é um aparelho estático, sem partes em movimento, que se destina a transferir energia elétrica de um circuito para outro, ambos de corrente alternada (CA), sem mudança no valor da frequência. O lado que recebe a potência a ser transferida é chamado de circuito primário e o lado do transformador que entrega potência é chamado de circuito secundário. A transferência é realizada por indução eletromagnética.



**Figura 1 – Estabelecimento do fluxo entre duas bobinas.**

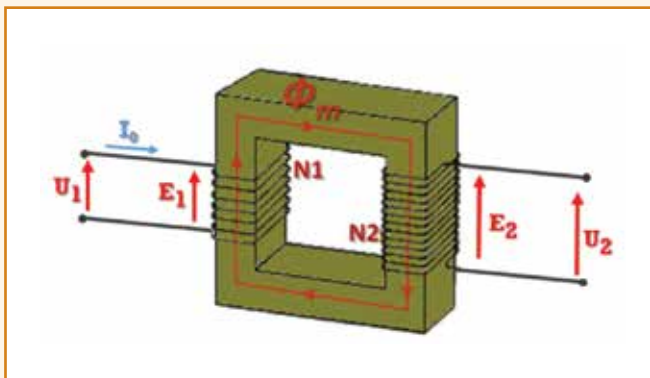
Simplificando-se a lei de Lenz-Faraday, tem-se que, sempre que houver movimento relativo entre um campo magnético e um condutor, será induzida uma tensão (f.e.m. - força eletromotriz) em seus terminais.

Pode-se ainda afirmar que ocorrerá a indução de corrente quando uma espira condutora é colocada (imóvel) em uma região onde existe um campo magnético variável ou quando um circuito é posto em movimento dentro de um campo magnético constante. A Figura 1 mostra a representação do estabelecimento do fluxo magnético pela bobina primária devido à aplicação da tensão  $U_1$ . Aplicando-se a tensão  $U_1$ , no primário do transformador, circulará uma pequena corrente denominada “corrente em vazio”, representada neste texto por  $I_0$ . Se a tensão aplicada é variável no tempo, a corrente  $I_0$  também o é. De acordo com a lei de Ampère, tem-se:

$$H \cdot l = N_1 \cdot I_0 \quad (1)$$

Em que:

- $H$  é a intensidade do campo;
- $l$  é o comprimento do circuito magnético;
- $N_1 I_0$  é a força magnetomotriz.



**Figura 2 – Aplicação de tensão no primário do transformador e estabelecimento da corrente em vazio.**

A expressão (1) pode ser reescrita como:

$$R_c \cdot \phi = N_1 \cdot I_0 \quad (2)$$

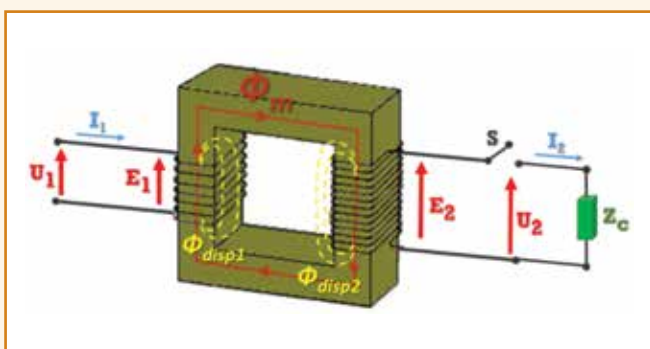
Em que:

- $R_c$  é a relutância do núcleo;
- $\phi$  é o fluxo magnético.

Dessa forma, verifica-se que a força magnetomotriz impulsiona o fluxo magnético pelo núcleo, sendo limitado pela relutância. Naturalmente, se a corrente é variável no tempo, o fluxo magnético também é. Por outro lado, sabe-se pela lei de Faraday que “sempre que houver movimento relativo entre o fluxo magnético e um circuito por ele cortado serão induzidas tensões neste circuito”.

### O transformador em operação

Considerando a Figura 3:



**Figura 3 – Representação do transformador operando em vazio.**

Com o transformador operando em vazio, ou sem carga, a corrente  $I_0$  magnetiza o transformador e induz as tensões  $E_1$  e  $E_2$ . Fechando-se a chave S do circuito secundário do transformador, haverá circulação da corrente  $I_2$  em seu enrolamento, cujo valor depende exclusivamente da carga  $Z_c$ . Como visto, de acordo

com a lei de Ampère,  $I_2$  criará o fluxo de reação  $\phi_2$  e de dispersão  $\phi_{disp2}$ , sendo que o primeiro tende a anular  $\phi_m$ . Para que o transformador continue magnetizado, haverá uma compensação de fluxo no primário, ou seja: para manter a magnetização, o transformador exigirá da rede uma corrente suplementar a  $I_0$ , de modo a compensar  $\phi_2$ ; esta corrente receberá a denominação de  $I_2'$ , a qual cria o fluxo  $\phi_1$ . Assim, a corrente primária  $I_1$  é:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2} \quad (3)$$

Em que:

$$I_0 = \sqrt{I_1^2 - I_2'^2} \quad (4)$$

Da expressão (4) é possível concluir que, em qualquer condição de operação do transformador, sempre existirá a corrente  $I_0$  e que somente ela é responsável pela indução de  $E_1$  e  $E_2$ , em outras palavras,  $E_1$  e  $E_2$  independem do regime de carga.

### Relação de transformação de um transformador monofásico

A relação de transformação das tensões de um transformador monofásico é definida de duas formas:

#### Relação de transformação teórica ou relação de espiras

A relação de número de espiras, definida por  $K_N$ , é dada pela relação das quedas de tensão internas nas bobinas do transformador. Assim, tem-se:

$$K_N = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

Para o transformador operando em vazio, tem-se que:

$$I_1 = I_2 \quad I_1 = I_0 \quad (6)$$

Devido a este fato, a queda de tensão primária é mínima; assim:

$$U_1 \approx E_1 \quad (7)$$

Além disto, nesta condição:

$$U_2 = E_2 \quad (8)$$

Assim

$$K_N = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \quad (9)$$

A expressão (9) é importante, pois  $E_1$  e  $E_2$  são acessíveis a uma medição. Assim, utilizando-se um voltímetro no primário, obtêm-se  $U_1$  e, no secundário, estando o transformador em vazio,  $U_2$ ; desta forma, acha-se a relação do número de espiras com pequeno erro.

### Relação de transformação real

Ao aplicar uma carga  $Z_C$  ao secundário, a corrente  $I_2$  circula pelo secundário e  $I_1$  assume valores superiores a  $I_0$  assim, haverá queda de tensão no primário e no secundário e, portanto:

$$U_2 \neq E_2 \quad (10)$$

Nestas condições, define-se a relação de transformação real ou a relação entre as tensões primárias e secundárias quando do transformador em carga, ou seja:

$$K = \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1} \quad (11)$$

Eventualmente, se a queda de tensão secundária for pequena (o que acontece para transformadores bem projetados) pode-se supor que:

$$K_N = K \quad (12)$$

Observe-se que:

- se  $K > 1$ , o transformador é abaixador; e,
- se  $K < 1$ , o transformador é elevador.

### Princípio de funcionamento do transformador trifásico

A transformação trifásica pode ser realizada com um único transformador destinado a este fim ou por um banco de transformadores monofásicos. No caso de um transformador único, o custo inicial é inferior ao uso de bancos, pois existirá apenas uma unidade. Entretanto, exige outro transformador de mesma potência como reserva. A Figura 4 mostra a representação de um transformador trifásico com as bobinas de cada fase dispostas em uma única perna do núcleo magnético. Além de promover a sustentação mecânica para as bobinas, o núcleo cria o caminho para a condução do fluxo magnético.

### Núcleo

O núcleo do transformador é construído com uso de chapas de aço-silício, laminadas e cobertas por uma película isolante. Com laminação a frio e tratamento

térmico, ocorre a orientação dos domínios magnéticos permitindo a redução das perdas e da corrente de magnetização e possibilitando alcançar altas densidades de fluxo. A estrutura formada pelas chapas é sustentada por traves metálicas solidamente amarradas por faixas de fibra de vidro impregnadas com resina.

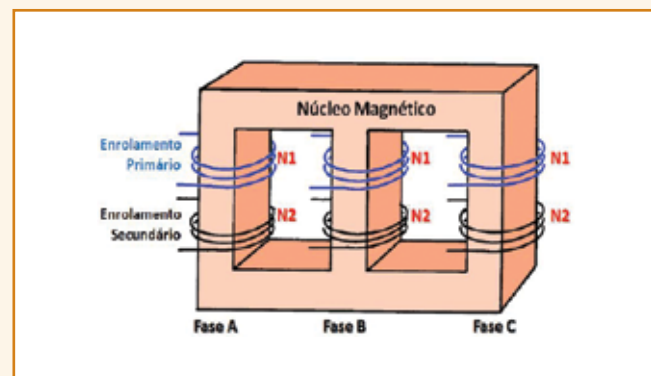


Figura 4 – Representação de um transformador trifásico.

Um sistema trifásico simétrico e equilibrado possui três correntes com mesmo módulo, porém, defasadas de  $120^\circ$  elétricas uma das outras. Pela lei de Ampère, elas originam fluxos nos núcleos monofásicos, também defasados de  $120^\circ$ . Analogamente às correntes trifásicas, quando os fluxos juntarem-se em um ponto, sua soma será nula, o que ocorre no local de união dos três núcleos. A solução que se adota, em termos práticos, é bastante simples, ou seja: retira-se um dos núcleos, inserindo entre as colunas (ou pernas) laterais, outra com as mesmas dimensões. O circuito magnético das três fases, neste caso, resulta desequilibrado. A relutância da coluna central é menor que as outras, originando uma pequena diferença nas correntes de magnetização de cada fase. Existem diversos tipos de núcleo, entretanto o mostrado na Figura 5 é o mais comum devido à sua facilidade construtiva e de transporte.

Este tipo de núcleo, em relação a três monofásicos, apresenta como vantagem o fato de que quaisquer

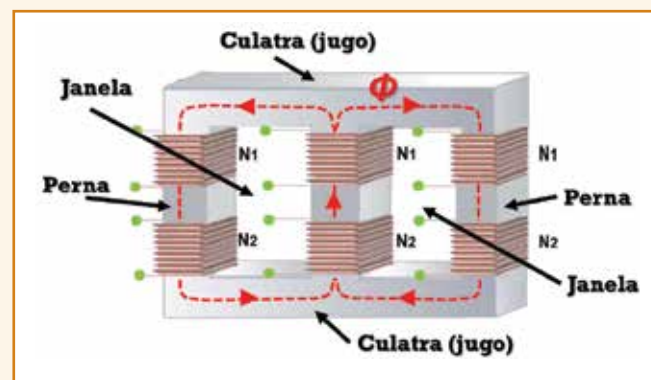
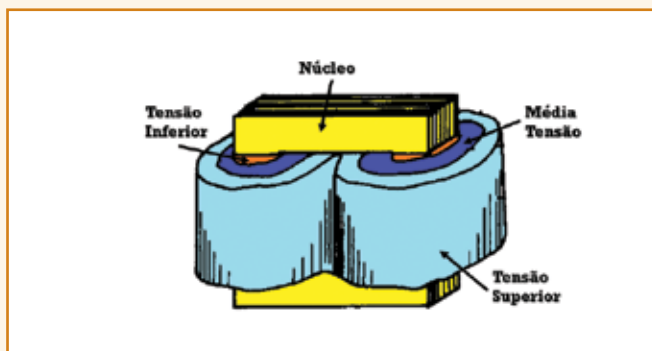


Figura 5 – Núcleo de um transformador trifásico real.

desequilíbrios magnéticos causados pelas diferentes condições elétricas das três fases, tendem desaparecer graças à interconexão magnética existente entre elas; assim, a fluxo de cada perna distribui-se obrigatoriamente pelas outras duas. Além disso, existe a economia de material em relação ao uso de três transformadores monofásicos, e consequente diminuição das perdas em vazio.

Como desvantagem, tem-se que as unidades reservas são mais caras, pois deverão ter a potência total do transformador a ser substituído; o monofásico de reserva, por outro lado, pode ter apenas um terço da potência do conjunto.



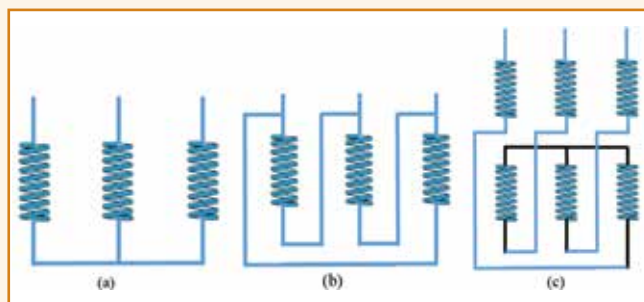
**Figura 6 – Disposição dos enrolamentos montados no núcleo do transformador.**

### **Enrolamentos**

Responsável pela condução da corrente de carga, os condutores são enrolados em forma de bobinas cilíndricas e dispostas axialmente nas pernas do núcleo. A Figura 6 mostra a disposição dos enrolamentos com ordem crescente de tensão, ou seja, a bobina de tensão inferior é colocada próxima ao núcleo e assim por diante.

Os enrolamentos de um transformador trifásico podem ser conectados em estrela (Y), delta ( $\Delta$ ) ou zig-zag, conforme mostra a Figura 7.

As ligações delta e estrela são as mais comuns. A ligação zig-zag é tipicamente uma conexão



**Figura 7 – Conexões possíveis dos enrolamentos de um transformador trifásico: (a) estrela, (b) delta, (c) zig-za**

secundária. A sua característica principal é sempre afetar igual e simultaneamente duas fases primárias, pois os seus enrolamentos são montados em pernas distintas seguindo uma ordem de permutação circular. Naturalmente, este fato a torna mais adequada para ser utilizada em presença de cargas desequilibradas.

Adotando-se o padrão de designar as ligações primárias por meio de letras maiúsculas e secundárias por letras minúsculas, tem-se na Tabela 1 as conexões dos enrolamentos. O princípio de funcionamento é basicamente o mesmo do monofásico, tanto em vazio como em carga.

**TABELA 1 – CONEXÕES DOS ENROLAMENTOS**

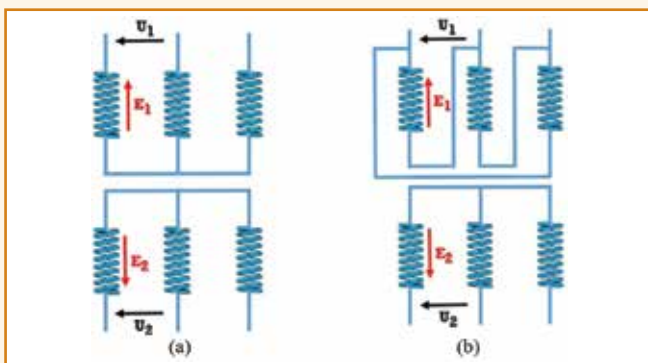
PRIMÁRIO	D	D	D	Y	Y	Y
SECUNDÁRIO	d	y	z	d	y	z

### Relação de transformação de transformadores trifásicos

Como se sabe, a relação de transformação real é definida como a relação entre as tensões primárias ( $U_1$ ) e as secundárias ( $U_2$ ), ou seja:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (13)$$

No transformador trifásico a relação de transformação tem a mesma definição, sendo as tensões entre fases; porém, devido à conexão dos enrolamentos ( $E_1$  e  $E_2$  são tensões induzidas entre os terminais dos enrolamentos), ela não será, em todos os casos, igual à relação de espiras. A Figura 8 mostra duas conexões de transformadores trifásicos.



**Figura 8 – Conexões de transformador trifásico.**

Sendo assim, as relações de transformação  $K$  e  $K_N$  para cada caso seriam:

### Na Figura 8a:

Sendo (13) e estando o transformador em vazio, tem-se:

$$U_1 \cong E_1 \quad (14)$$

$$U_2 = E_2 \quad (15)$$

Então:

$$K = K_N \quad (16)$$

### Na Figura 8b:

$$K = \frac{U_1}{U_2} \quad (17)$$

Entretanto, como os enrolamentos podem estar conectados de diversas maneiras, nota-se que para cada modo de ligação haverá uma diferença entre a relação de transformação e a relação do número de espiras. A Tabela 2 mostra os valores de  $K$  em função de  $K_N$  para cada ligação:

**TABELA 2 – VALORES DE  $K$  EM FUNÇÃO DE  $K_N$  PARA AS DIVERSAS LIGAÇÕES**

LIGAÇÃO	Dd	Dy	Dz	Yy	Yd	Yz
$K$	$K_N$	$\frac{K_N}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{3}K_N$	$K_N$	$\sqrt{3}K_N$	$\frac{2}{\sqrt{3}}K_N$

### Corrente em vazio

Nos transformadores trifásicos, com a montagem de núcleo mostrada, as correntes de magnetização devem ser iguais entre si, nas fases laterais, e ligeiramente superiores na fase da perna central. Isto se deve ao fato de que as relutâncias das pernas correspondentes as laterais são maiores. Dessa forma, adota-se um valor médio para a corrente em vazio, ou seja:

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3} \quad (18)$$

### Circuito equivalente e parâmetros do transformador

De uma forma geral, os sistemas de potência são representados por apenas uma fase e um neutro, considerando as restantes como simétricas, evidentemente, consegue-se isto com a ligação Y. No caso dos parâmetros percentuais, tal fato é irrelevante, pois independem das conexões dos enrolamentos, enquanto nos magnetizantes, ocorre exatamente o contrário.

Assim no caso do primário em ligação delta, utiliza-se transformá-la na estrela equivalente. Desta forma, o transformador trifásico será representado

pelos parâmetros de uma fase, supondo as conexões primárias em estrela e carga trifásica simétrica e equilibrada.

### ***Tipos de transformadores de potência***

São classificados como transformadores de potência em dois grupos:

- Transformadores de potência ou de força, os quais são utilizados, normalmente, em subestações abaixadoras e elevadoras de tensão, empregados para gerar, transmitir ou distribuir energia elétrica. Podem ser considerados como transformadores de força aqueles com potência nominal superior a 500 KVA, operando com tensão de até 765 KV;
- Transformadores de distribuição, cuja função é de abaixar a tensão para a distribuição a centros de consumo e clientes finais das empresas de distribuição. São normalmente instalados em postes, plataformas ou câmeras subterrâneas. Possuem potência típicas de 30 kVA a 300 kVA. Em alta tensão apresenta de 15 kV ou 24,2 KV, e em baixa tensão de 380 V a 127 V.



**Figura 9 – Transformadores de distribuição (monofásico e trifásico, respectivamente).**



**Figura 10 – (a) Transformador subterrâneo utilizado em câmaras abaixo do nível do solo. (b) Transformador enclausurado em que o óleo do transformador não tem contato com o exterior.**

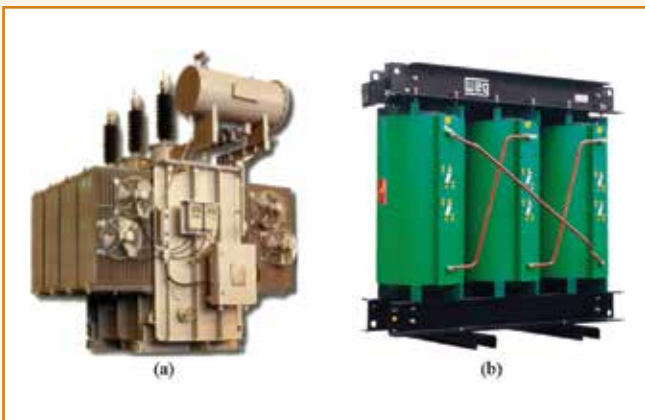


**Figura 11 – (a) Transformador autoprotegido incorpora componentes para proteção do sistema de distribuição contra sobrecargas e curto circuitos na rede. (b) Transformador de pedestal (pad-mounted), que, além dos componentes de proteções contra sobrecargas, curtos-circuitos e falhas internas, possui características particulares de operação, manutenção e segurança.**

A função do isolante em transformadores é garantir o isolamento elétrico entre as partes energizadas e permitir a refrigeração interna. Transformadores utilizam óleo mineral derivado de petróleo, óleos sintéticos como óleos de silicones e ascaréis, óleos isolantes de origem vegetal, isoladamente a base de compostos resinosos a seco ou isolado a gás SF<sub>6</sub> (hexafluoreto de enxofre).

A partir da definição do isolante, um transformador pode ser classificado como:

- Transformador em líquido isolante, cujas partes ativas são imersas em óleo isolante mineral, vegetal ou sintético; ou
- Transformador a seco, geralmente isolados com resinas.



**Figura 12 – (a) Transformador de força a óleo. (b) Transformador a seco.**

### **Crítérios de classificação**

Vários autores e trabalhos técnicos têm classificado os transformadores de acordo com sua função no sistema, com os enrolamentos, com o material do núcleo, com a quantidade de fases, dentre outros elementos. A seguir são apresentados alguns desses critérios:

### **Finalidade**

- De corrente
- De potencial
- De distribuição
- De potência

### **Função no sistema**

- Elevador
- Abaixador
- De interligação

### **Sobre os enrolamentos**

- Dois ou mais enrolamentos
- Autotransformador

### **Material do núcleo**

- Ferromagnético
- Núcleo a ar

### **Quantidade de fases**

- Monofásico
- Polifásico

### **Normas técnicas**

As principais normas da ABNT sobre transformadores de potência são as seguintes:

- ABNT NBR 5356-1 – Transformadores de potência – Parte 1: Generalidades;
- ABNT NBR 5356-2 – Transformadores de potência – Parte 2: Aquecimento;
- ABNT NBR 5356-3 – Transformadores de potência – Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar;
- ABNT NBR 5356-4 – Transformadores de potência – Parte 4: Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores;
- ABNT NBR 5356-5 – Transformadores de potência – Parte 5: Capacidade de resistir a curto circuitos;
- ABNT NBR 5416 – Aplicação de cargas em Transformadores de potência – Procedimento;
- ABNT NBR 5440 – Transformadores para redes aéreas de distribuição – Requisitos;
- ABNT NBR 5458 – Transformadores de potência – Terminologia;
- ABNT NBR 7036 – Recebimento, instalação e



**TABELA 3 - TIPOS DE TRANSFORMADORES EM RELAÇÃO AO TIPO DE SUBESTAÇÃO**

TIPO DE SUBESTAÇÃO	PARA USO INTERIOR	PARA USO EXTERIOR	FORÇA	DISTRIBUIÇÃO	SUBTERRÂNEO	SUBMERSÍVEL	PEDESTAL
ABRIGADA EM ALVENARIA	X		X				
ABRIGADA EM CABINE METÁLICA	X		X				
SUBTERRÂNEA ESTANQUE					X		
SUBTERRÂNEA NÃO ESTANQUE						X	
AO TEMPO NO NÍVEL DO SOLO		X	X				X
AO TEMPO ACIMA DO NÍVEL DO SOLO		X	X	X			

manutenção de transformadores de potência para distribuição, imersos em líquidos isolantes;

- ABNT NBR 7037 – Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência em óleo isolante mineral;
- ABNT NBR 8926 – Guia de aplicação de relés para proteção de transformadores – Procedimento;
- ABNT NBR 9368 – Transformadores de potência de tensões máximas até 145 kV – Características elétricas e mecânicas;
- ABNT NBR 9369 – Transformadores subterrâneos – Características elétricas e mecânicas – Padronização;
- ABNT NBR 10022 – Transformadores de potência com tensão máxima igual ou superior a 72,5 kV – Características específicas – Padronização;
- ABNT NBR 10295 – Transformadores de potência secos – Especificação;
- ABNT NBR 12454 – Transformadores de potência de tensões máximas até 36,2 kV e potência de 225 kVA até 3750 kVA – Padronização;
- ABNT NBR 15349 – Óleo mineral isolante – Determinação de 2-furfural e seus derivados;
- ABNT NBR 15422 – Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos.

### Tipos de transformadores em relação aos tipos de subestações

Conforme a seção 9 da ABNT NBR 14039 (subestações), os transformadores podem ser instalados em subestações abrigadas (em alvenaria ou cabinas metálicas), subterrâneas (em câmaras estanques ou não à penetração de água) e ao tempo (no nível do solo ou acima dele).

Neste sentido são definidos na ABNT NBR 5458 os seguintes tipos de transformadores:

- Transformador para interior: aquele projetado para ser abrigado permanentemente das intempéries;
- Transformador para exterior: aquele projetado para suportar exposição permanente às intempéries;
- Transformador submersível: aquele capaz de funcionar normalmente mesmo quando imerso em água, em condições especificadas;
- Transformador subterrâneo: aquele construído para ser instalado em câmara, abaixo do nível do solo;

A Tabela 3 indica os tipos de transformadores que podem ser utilizados em função dos tipos de subestações definidos na ABNT NBR 10439.

### Referências

- ALMEIDA, A. T. L.; PAULINO M. E. C. Manutenção de transformadores de potência. Curso de Especialização em Manutenção de Sistemas Elétricos – UNIFEI, 2012.
- MILASCH, M. Manutenção de transformadores em líquido isolante. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.
- OLIVEIRA, J. C.; ABREU, J. P. G.; COGO, J. R. Transformadores: teoria e ensaios. São Paulo: Edgard Blucher, 1984
- GUIA O SETOR ELÉTRICO DE NORMAS BRASILEIRAS. São Paulo, Atitude Editorial, 2011.

---

*\*MARCELO EDUARDO DE CARVALHO PAULINO é engenheiro eletricista e especialista em Manutenção de Sistemas Elétricos pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Atualmente, é gerente técnico da Adimarco |mecpaulino@yahoo.com.br.*

### Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osestoreletrico.com.br](http://www.osestoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)