

## *MÁQUINAS ELÉTRICAS*

## *TRANSFORMADORES*



**SUMARIO**

<i>Introdução.....</i>	<i>03</i>
<i>Potência dos transformadores.....</i>	<i>03</i>
<i>Necessidade de Transformação das Correntes Alternadas .....</i>	<i>03</i>
<i>Princípio de Construção do Transformador.....</i>	<i>04</i>
<i>Princípio de Funcionamento do Transformador.....</i>	<i>04</i>
<i>Relação de Transformação.....</i>	<i>05</i>
<i>Potência dos transformadores.....</i>	<i>06</i>
<i>Taps.....</i>	<i>06</i>
<i>Tipos de Enrolamentos.....</i>	<i>07</i>
<i>Enrolamentos Cilíndricos ou concêntricos.....</i>	<i>07</i>
<i>Material do Núcleo.....</i>	<i>08</i>
<i>Lâminas Padronizadas.....</i>	<i>08</i>
<i>Lâminas não padronizadas.....</i>	<i>09</i>
<i>Tipos de Núcleos.....</i>	<i>10</i>
<i>Núcleo Envolvido.....</i>	<i>10</i>
<i>Núcleo Envolvente ou Encouraçado.....</i>	<i>10</i>
<i>Tipos de Resfriamento.....</i>	<i>10</i>
<i>Transformador a Seco.....</i>	<i>10</i>
<i>Transformador imerso em líquido isolante.....</i>	<i>11</i>
<i>O líquido isolante.....</i>	<i>11</i>
<i>Radiadores.....</i>	<i>12</i>
<i>Conservador de líquido isolante ou tanque de expansão.....</i>	<i>14</i>
<i>Reservatório de sílica gel ou secador de ar.....</i>	<i>15</i>
<i>Terminais.....</i>	<i>15</i>
<i>Tipos de óleo isolante.....</i>	<i>15</i>
<i>Perdas no transformador.....</i>	<i>16</i>
<i>Localização dos terminais dos transformadores.....</i>	<i>16</i>
<i>Classificação quanto ao número de fases.....</i>	<i>17</i>
<i>Tensão de linha e tensão de fase no secundário dos transformadores.....</i>	<i>18</i>
<i>Ligações usuais em transformadores trifásicos.....</i>	<i>19</i>
<i>Transformadores de aterramento.....</i>	<i>20</i>
<i>Transformadores subterrâneos.....</i>	<i>20</i>
<i>Classificação de transformadores em função das diferentes aplicações.....</i>	<i>20</i>
<i>Banco de transformação trifásico.....</i>	<i>20</i>
<i>Agrupamento de transformadores em paralelo.....</i>	<i>20</i>
<i>Exercícios de fixação.....</i>	<i>21</i>

## Introdução

Um transformador é um dispositivo (máquina estática) destinado a transmitir energia elétrica ou potência elétrica de um circuito a outro, transformando tensões, correntes e modificando os valores da Impedância elétrica de um circuito elétrico, eles não são acoplados eletricamente, mas são fortemente acoplados magneticamente. Trata-se de um dispositivo de corrente alternada que opera baseado nos princípios eletromagnéticos, Lei de Faraday e da Lei de Lenz.

**Lei de Faraday**, também conhecida como **lei da indução eletromagnética**, afirma que a variação no fluxo de campo magnético através de materiais condutores induz o surgimento de uma corrente elétrica.

A **Lei de Lenz** determina o sentido da corrente elétrica que surge em um circuito, a partir da variação do fluxo magnético (indução eletromagnética).

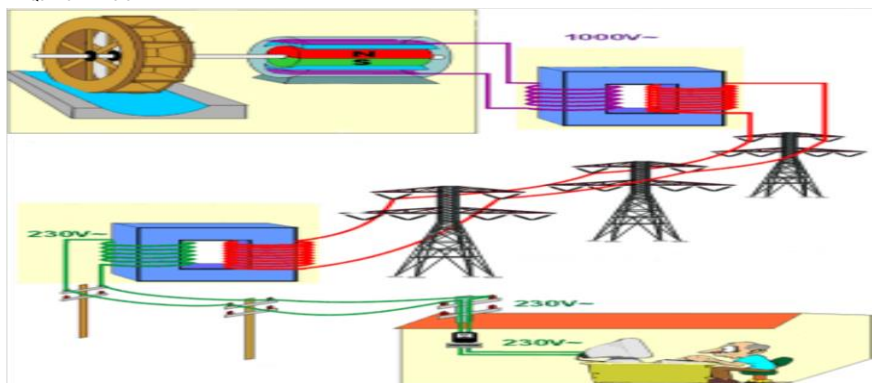
O transformador consiste de duas ou mais bobinas ou enrolamentos. Todos os transformadores têm o mesmo princípio de funcionamento, independente do seu tipo. No caso dos transformadores de dois enrolamentos, é comum denominá-los como enrolamento primário e secundário, existe ainda transformador de três enrolamentos sendo que o terceiro é chamado de terciário e que tem finalidade específica. Existe também um tipo de transformador denominado Autotransformador, no qual o enrolamento secundário possui uma conexão elétrica com o enrolamento do primário.



**Figura 1.** Transformador de potência.

## Necessidade de Transformação das Correntes Alternadas

O transformador é um dispositivo de grande importância nos sistemas elétricos. Com ele é possível ajustar tensões para os mais diferentes níveis necessários no sistema elétrico, possibilitando a geração, transmissão e distribuição em níveis de tensões diferentes, a figura 2 mostra um esquema simplificado do sistema elétrico, onde é possível identificar a importância do transformador.



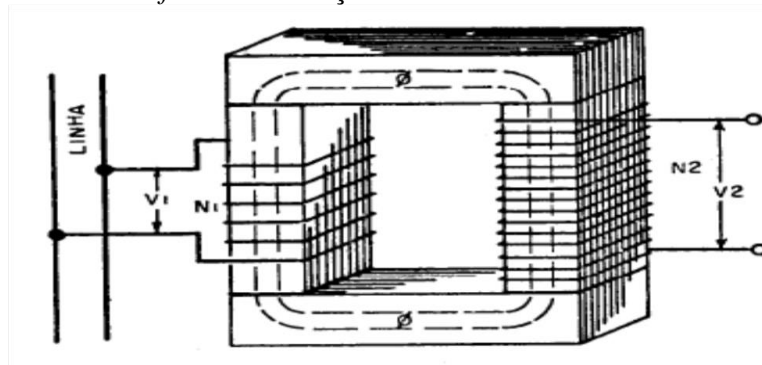
**Figura 2.** Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica.

Na figura 2 a energia contida na força das águas move a turbina fazendo girar o rotor do gerador. A tensão é gerada em níveis baixos (1-15kV). Para evitar perdas na transmissão ( $P=RI^2$ ) é necessário aumentar a tensão para reduzir a corrente, e consequentemente reduzir a perda por efeito Joule. Esta elevação de tensão é feita por um transformador chamado de elevador, que aumenta a tensão de (1-15kV) para cerca de (100-700kV). Por efeito de segurança os consumidores não podem utilizar a energia em níveis altos de tensão, por isso há necessidade de abaixar a tensão das linhas de transmissão para uma tensão compatível os consumidores, para isso se utiliza um transformador denominado abaixador, que reduz a tensão das linhas de transmissão de (100-700kV) para (127-220V ou 220 – 380V).

Alguns consumidores industriais recebem energia elétrica em alta tensão e utilizam transformadores abaixadores para níveis de tensão adequados aos sistemas industriais de força e de iluminação e equipamentos elétricos em baixa tensão.

### Princípio de Construção do Transformador

O funcionamento de um transformador baseia-se nos fenômenos de indutância mútua entre dois circuitos eletricamente isolados e magneticamente acoplados. Para que a ligação magnética entre os dois circuitos seja a melhor possível, é necessário que os enrolamentos estejam envolvidos sobre um **núcleo magnético** de pequena **relutância**, ou seja, baixa resistência à passagem de fluxo magnético. Para evitar perdas no ferro, fatia-se o núcleo em **finas lâminas** de espessura entre 0,1 a 0,5mm, diminuindo a sua área da secção transversal e consequentemente aumentando a resistência elétrica. As lâminas que compõe o núcleo são isoladas uma das outras. A figura 3 mostra um transformador com núcleo envolvido, nesta figura também é possível se verificar a laminação do núcleo.



**Figura 3.** Construção básica do transformador.

Na construção de um transformador de potência, além da **parte ativa**, ou seja, **núcleo e bobinas** incluem-se outros elementos necessários ao seu funcionamento tais como uma caixa ou tanque de proteção da parte ativa ou para armazenamento do óleo isolante, terminais de ligação de entrada e saída (buchas alta e baixa tensão), radiadores para resfriamento do transformador e se necessário tanque de expansão, mais adiante veremos detalhadamente cada um dos elementos mostrados na figura abaixo.

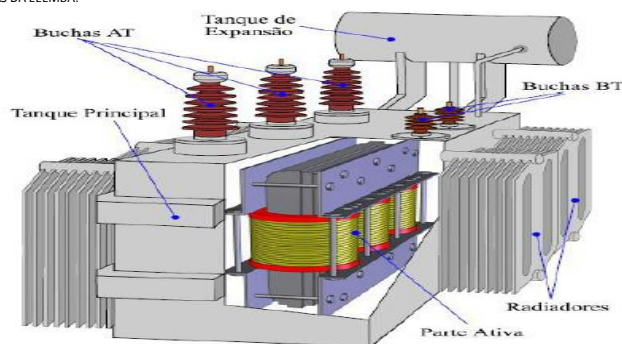


Figura 4. Partes construtivas de um transformador de potência.

### Princípio de Funcionamento do Transformador

Alimentando o enrolamento primário de um transformador com uma fonte de tensão alternada  $V_1$ , uma corrente  $i$  percorrerá esse enrolamento, criando um fluxo alternado que é direcionado pelo núcleo, passando “completamente” pelo secundário e induzindo a tensão  $V_2$ , conforme figura a seguir.

O enrolamento **primário** é sempre aquele que está ligado à fonte, e o **secundário** sempre o que está ligado à carga, não dependendo se os enrolamentos são de alta ou de baixa tensão.

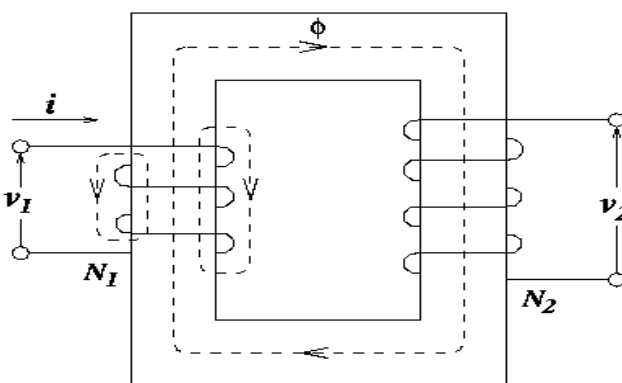


Figura 5. Transformador com enrolamento secundário aberto

A tensão induzida no transformador não depende unicamente do número de espiras e do fluxo, esta tensão também é diretamente proporcional à frequência da fonte de alimentação, isso nos informa que em maiores frequências temos uma maior tensão induzida no secundário.

### Relação de Transformação

Nos transformadores, assim como em qualquer outro tipo de dispositivo, é válido o princípio da conservação de energia, ou seja, **“a energia não poder ser criada nem destruída e sim transformada de uma forma para outra”**. Assim, a potência do lado primário deve ser igual à potência no lado secundário do transformador.

Os transformadores se baseiam no **princípio da indução** e cuja finalidade é permitir a transformação de tensões alternadas.

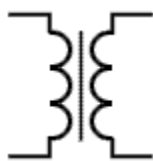


Figura 6. Esquema elétrico de um transformador.

Consideremos os dois circuitos: se o enrolamento do primeiro circuito tiver  $n_1=10$  espiras e o segundo circuito,  $n_2=500$  espiras e se as tensões do primário e secundário forem respectivamente  $E_1=120\text{V}$  e  $E_2=6000\text{V}$ . Queremos saber o valor da relação de transformação.

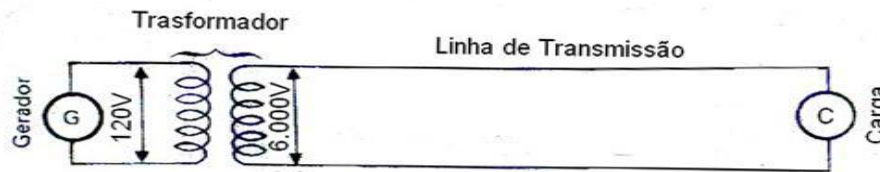


Figura 7. Esquema elétrico de um gerador, transformador, linha de transmissão e carga.

$$r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Relação de transformação}$$

$$\text{Ou no caso: } r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{500}{10} = 50$$

Isso significa que, nesse exemplo,  $E_2$  deve ser 50 vezes maior que  $E_1$ . Nessas condições se o gerador de CA desenvolver entre as extremidades do primeiro enrolamento, uma tensão  $E_1=120\text{V}$  a tensão induzida no enrolamento nº 2 será:  $E_2=E_1 \times r$   $E_2 = 120 \times 50$   $E_2 = 6000\text{V}$

O enrolamento que se liga diretamente ao gerador, isto é, o enrolamento do circuito nº 1, chama-se **primário**. O outro enrolamento, onde a f.e.m é induzida chama-se **secundário**.

O primário pode funcionar como secundário e vice-versa.

Um transformador que tem uma tensão no secundário menor que a tensão do primário é um transformador **reduzidor ou abaixador de tensão**. Um transformador que tem uma tensão no secundário maior que a tensão do primário é um transformador **elevador de tensão**.

### Potência dos transformadores

$$P_1 = P_2$$

Então,

$$E_1 \times I_1 = E_2 \times I_2$$

**Exemplo:**

Calcule a corrente do primário de um transformador que tem uma tensão no primário igual a 100V e uma tensão no secundário de 500V. A corrente no secundário é de 2 A.

Solução:  $I_1 = ?$  ;  $E_1 = 100\text{V}$  ;  $E_2 = 500\text{V}$  ;  $I_2 = 2\text{ A}$

$$E_1 \times I_1 = E_2 \times I_2$$

$$100 \times I_1 = 500 \times 2$$

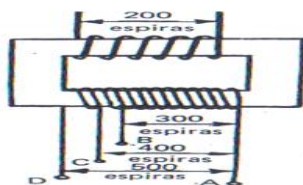
$$100 \times I_1 = 1000 \rightarrow I_1 = \frac{1000}{100} \rightarrow I_1 = 10\text{ A}$$

As correntes são inversamente proporcionais às tensões, isto é, se a tensão no secundário for 2,3,4... vezes maior do que a tensão do primário, a corrente no secundário será 2,3,4... vezes menor do que a corrente no primário e vice-versa.

### Taps

Muitos transformadores possuem além das extremidades outros pontos dos enrolamentos que também servem para estabelecer ligações com seus terminais. **Taps** é a denominação dada a esses pontos cuja finalidade é permitir que um único transformador possa funcionar com diversas relações de transformação.





**Figura 8.** Transformador com taps que permitem três relações de transformação.

Para uma maior elucidação, imagine um transformador que tenha em seu enrolamento primário 200 espiras e esteja destinado a receber 100Volts, enquanto que o enrolamento secundário consta de uma bobina com um determinado número de taps, que permite a obtenção de 300,400 e 500 espiras. Nesse caso é possível obter três relações de transformação diferentes, portanto três valores de tensões nessas derivações.

Nesse exemplo, se for aplicada no enrolamento primário uma tensão de 100v, quais serão as tensões entre os taps AB, AC e AD?

**Solução:**

O enrolamento primário tem 200 espiras e foi aplicado 100v. Calculando-se as relações de transformação e multiplicando essas relações pela tensão do primário será possível encontrar essas tensões.

**Entre AB**

$$r = \frac{300}{200} \quad r = 1,5 \quad E_{AB} = E_1 \times r \quad E_{AB} = 100 \times 1,5 \quad E_{AB} = 150v$$

**Entre AC**

$$r = \frac{400}{200} \quad r = 2 \quad E_{AC} = E_1 \times r \quad E_{AC} = 100 \times 2 \quad E_{AC} = 200v$$

**Entre AD**

$$r = \frac{500}{200} \quad r = 2,5 \quad E_{AD} = E_1 \times r \quad E_{AD} = 100 \times 2,5 \quad E_{AD} = 250v$$

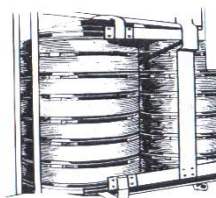
### **Tipos de Enrolamentos**

Independentemente do tipo de construção do transformador, os dois enrolamentos o de alta tensão (A.T) e o de baixa tensão (B.T) são em geral colocados na mesma coluna. Com a intenção de reduzir a dispersão de fluxo magnético. Nos transformadores industriais há várias maneiras de dispor os enrolamentos. Existem dois tipos de enrolamentos, o cilíndrico e em disco.

Para os grandes transformadores existem três tipos principais de enrolamento:



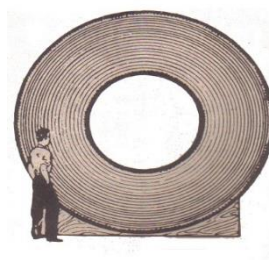
**Figura 9.** Enrolamento em espira.



**Figura 10.** Enrolamento em bobinas parciais.



**Figura 11.** Camada de espira envolvida por material isolante flexível.

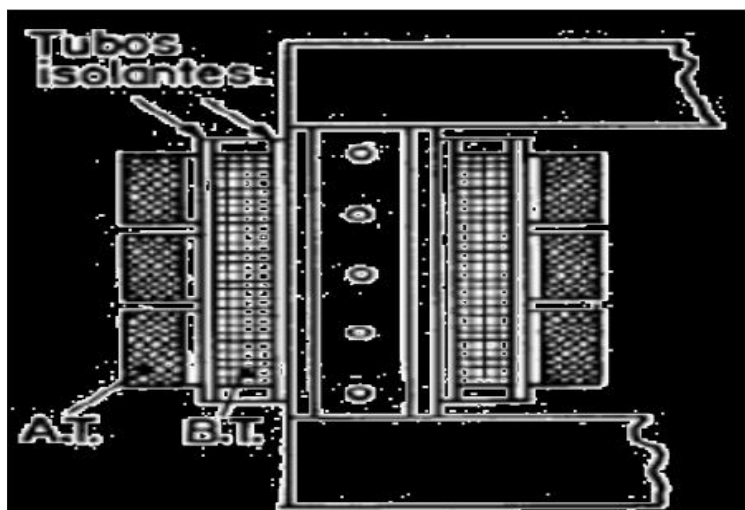


**Figura 12.** Enrolamento de disco.

### **Enrolamentos Cilíndricos ou concêntricos**

Nesta construção os dois enrolamentos são dispostos um dentro do outro. Quando o transformador é de alta e baixa tensão, são separados por um material isolante.

A figura 13 nos mostra o corte de um transformador de enrolamentos cilíndrico, nesta mesma figura é possível observar também que o enrolamento de baixa tensão está próximo do núcleo, isso não é por acaso, essa medida é tomada por motivos de segurança. O enrolamento de alta é dividido em várias bobinas sobrepostas e devidamente distanciadas em razão do maior número de espiras nos transformadores abaixadores.



**Figura 13.** Transformador com enrolamento cilíndrico.

Às vezes o enrolamento de B.T é subdividido em duas bobinas, sendo a primeira próxima ao núcleo e a outra externamente ao enrolamento de A.T. Este arranjo das bobinas diminui consideravelmente a dispersão de fluxo.

**Os enrolamentos de A.T e B.T têm construções diferentes.** No enrolamento de A.T o problema principal é a isolação e o B.T as dificuldades se concentram no manuseio mecânico, pois elas possuem grande secção do condutor. **O enrolamento de A.T tem uma grande quantidade de espiras com secção do condutor pequena, enquanto o enrolamento de B.T possui pequena quantidade de espiras com grande secção transversal do condutor.** A isolação das bobinas é feita normalmente com esmalte ou algodão.



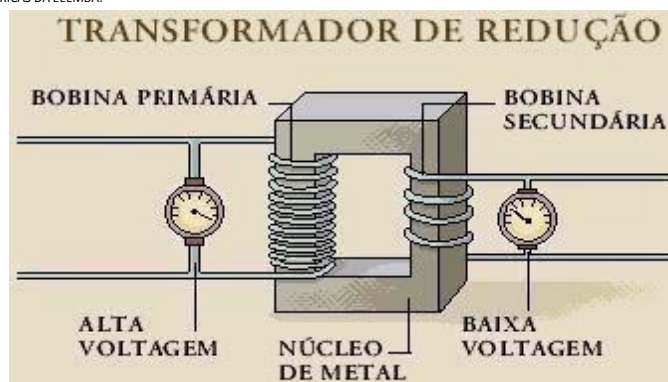


Figura 14. Transformador com bobinas A.T. e B.T.

### Material do Núcleo

a) Aço silício - GNO

b) Aço silício de grãos orientados - GO

Para reduzir as perdas por correntes parasitas deve-se aumentar a resistência elétrica do núcleo, o silício, que é um material não condutor, é misturado ao aço entre 3% a 5%, dando origem, ao **aço silício de grão não orientado – GNO** utilizado na construção do núcleo dos transformadores.

O aço silício submetido a tratamento térmico e tendo os grãos do aço no mesmo sentido da laminação reduz consideravelmente as perdas, dando origem ao **aço silício de grãos orientados – GO** utilizado nos transformadores de potência por oferecerem melhor rendimento.

### Lâminas Padronizadas

As lâminas para transformadores de baixa potência são padronizadas normalmente nos seguintes formatos:



Figura 15. Lâminas padronizadas do núcleo com formatos de letras.

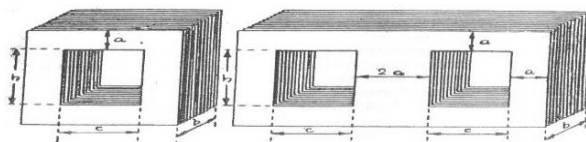


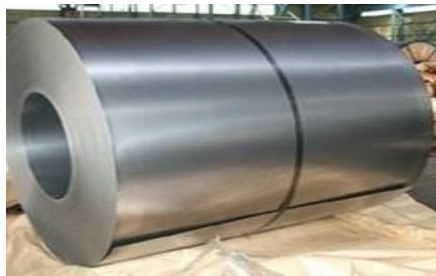
Figura 16. Formatos de núcleo nuclear e encouraçado.



Figura 17. Transformador de pequena potência com núcleo de lâminas padronizadas.

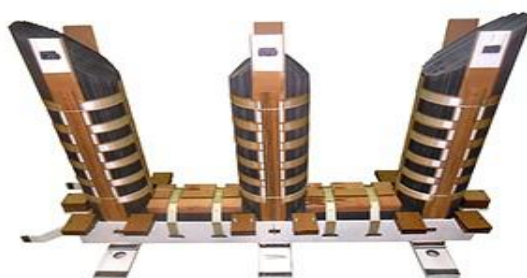
### Lâminas não padronizadas

O núcleo dos transformadores de potência é construído de lâminas não padronizadas porque as chapas são fornecidas em rolos e cortadas de acordo com o projeto do transformador.



**Figura 18.** Lâminas não padronizadas de aço silício de grão orientado.

O núcleo é montado lâmina a lâmina, obedecendo a critérios construtivos do núcleo em relação ao corte das lâminas. Na figura central abaixo mostra que as chapas são cortadas em pacotes de menor largura para possibilitar um formato circular do núcleo final e acomodar melhor as bobinas que em geral são cilíndricas. Note que na figura da direita abaixo o ângulo de corte do núcleo deve ser de 45º graus para reduzir as perdas, o aquecimento e melhorar o rendimento.



**Figura 19.** Núcleos construídos com lâminas não padronizadas.

### **Tipos de Núcleos**

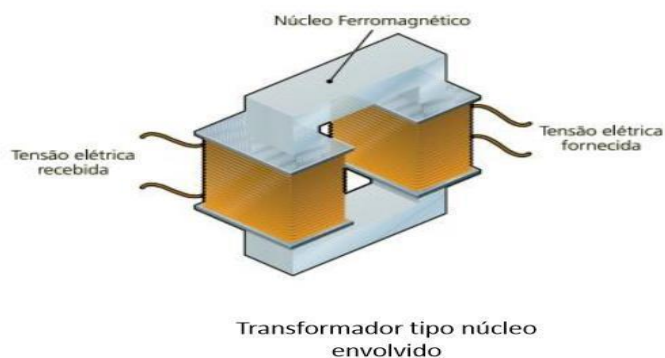
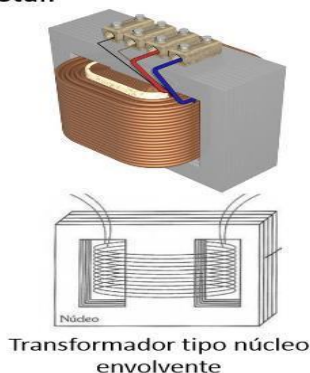
Como já mencionado anteriormente o núcleo é uma parte do transformador que tem a função de fortalecer o acoplamento magnético criado no primário. O núcleo tem também a função de servir de caminho para o fluxo magnético atravessar o enrolamento secundário, induzindo tensão no mesmo de forma eficiente. Para reduzir as perdas o núcleo não pode ser maciço, por isso é constituído por um pacote de finas lâminas (variam entre 0,1 a 0,5mm), de espessura, isoladas entre si através de verniz ou do próprio óxido de ferro das laminas.

**Há dois formatos de núcleos dos transformadores**, todos compostos de material ferro magnético, são eles:

**a) Núcleo Envolvido**

**b) Núcleo Envolvente**

Dois tipos construtivos são normalmente empregados com laminas de metal:



**Figura 20.** Núcleos do tipo envolvente e tipo envolvido.

### **Núcleo Envolvido**

*É um formato muito utilizado, mais barato, fácil de fabricar, no entanto, menos eficiente do que o núcleo envolvente. Nesse tipo de núcleo as bobinas do primário e secundário abraçam o núcleo.*

### **Núcleo Envolvente ou Encouraçado**

No núcleo envolvente aumenta a quantidade de material ferro magnético, e conseqüentemente aumenta o rendimento, isso se dá porque o fluxo encontra dois caminhos paralelos internamente ao ferro. Obtêm-se dessa forma, o máximo de acoplamento magnético, entretanto, necessita de tecnologia mais avançada na construção. **Nesse tipo de transformador o núcleo envolve as bobinas.**

### **Tipos de Resfriamento**

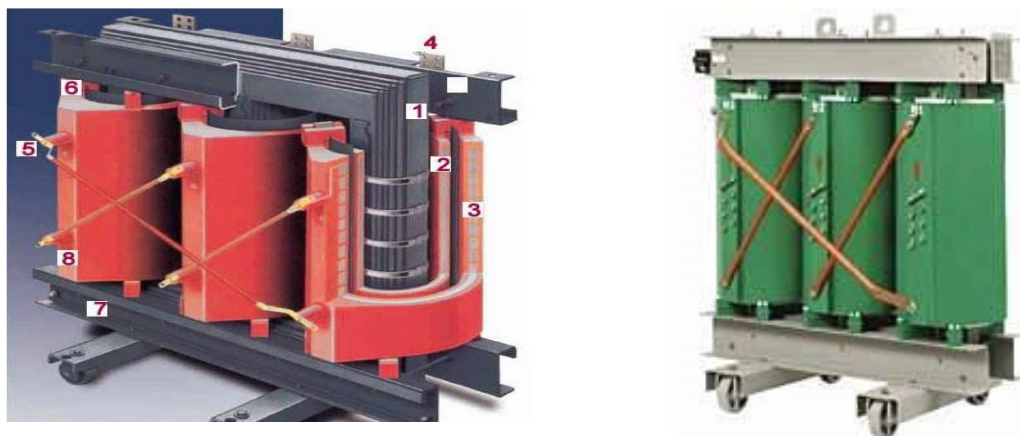
Em todos os transformadores é necessário se utilizar algum tipo de resfriamento, isso é de grande importância por que mesmo o transformador sendo um equipamento de grande eficiência, há perdas no núcleo e no cobre. Essa potência é dissipada por efeito Joule (na forma de calor). Se a temperatura interna do transformador chegar a níveis críticos, deteriora a isolação dos condutores causando um curto-circuito interno, diminui a eficiência do equipamento, causa redução da vida útil e envelhecimento do óleo isolante. **Os tipos de resfriamento são: a seco e por óleo isolante.**

### **Transformador a Seco**

Em um transformador **a seco**, a forma de resfriamento é o **próprio ar natural**, que circula o transformador ou **forçado** por meio de ventiladores.

Há pouco tempo atrás, os transformadores a seco existiam apenas para baixas potências e em baixa tensão. Com a evolução dos materiais isolantes, do material do núcleo e da qualidade dos condutores, surgiram os transformadores de potência **encapsulados em resina epóxi sob alto vácuo**.

Estes novos transformadores podem trabalhar com tensões (até 60kV) e potências (até 3.000kVA). A figura 21 é de transformadores a seco com os enrolamentos encapsulados por resina epóxi.



**Figura 21.** Transformadores de potência encapsulados em resina epóxi sob alto vácuo.

### **Transformador imerso em líquido isolante**

O transformador imerso em líquido isolante necessita de um tanque de aço onde a parte ativa do transformador (núcleo e bobinas) fica completamente imersa no líquido isolante.



**Figura 22.** Transformadores de potência monofásico imerso em óleo.

### **O líquido isolante**

Esse líquido isolante possui duas finalidades importantes, a saber:

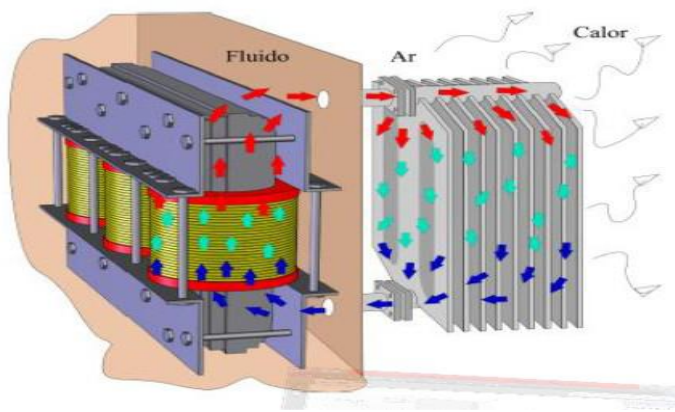
- **Isolante**, para isolamento das partes internas e,
- **Resfriamento**, para dissipação do calor interno produzido pelo funcionamento do transformador.

O líquido tem a finalidade de isolar os elementos que estão sob tensão elétrica no interior do tanque do transformador.

As diferenças de tensão interna entre o primário e o secundário e entre partes energizadas e o tanque (carcaça), podem originar por uma falha qualquer arcos elétricos internos entre partes condutoras sendo rapidamente interrompidos pelo líquido isolante.

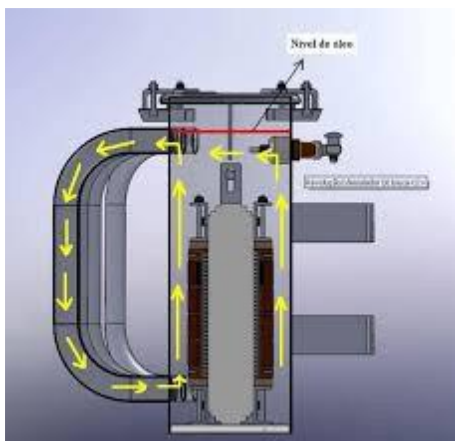
Outra finalidade importante é resfriar o transformador dissipando o calor produzido na parte ativa por **condução e por convecção**.

O óleo, em contato com as partes aquecidas do transformador **fica menos denso**, “mais leve”, o que causa um **movimento ascendente**, o óleo mais afastado da parte ativa **fica mais denso**, “mais pesado”, o que causa um **movimento descendente**, resultando uma lenta movimentação do óleo no tanque do transformador, através do processo chamado de **convecção**. Através desse processo calor da parte interna é transferido para o exterior pelas paredes do tanque e radiadores por **condução**. Veja figura a seguir.



**Figura 23.** Movimentação do óleo isolante no interior do transformador.

O líquido isolante é submetido à variação de temperatura o que faz aumentar o volume quando a temperatura aumenta e reduzir quando a temperatura diminui. Por esta razão no tanque deve existir **indicação do nível de óleo** formando um espaço chamado de “colchão de ar” para possibilitar “a respiração do transformador”, pela variação de volume do líquido isolante e do vapor do líquido isolante decorrente da elevação da temperatura sem comprometer a pressão interna do tanque.



**Figura 24.** Movimentação do óleo isolante no interior do transformador.

Em transformadores de menor potência o tanque pode ser de chapa de aço plana, pois a área da superfície do tanque em contato com o ambiente é suficiente para cumprir satisfatoriamente o resfriamento do transformador.

Aumentando a potência do transformador e o consequente aquecimento produzido pelo funcionamento normal, necessita maior área de superfície do tanque em contato com o ambiente.

Para atender a essa última necessidade dispõe-se o transformador de radiadores tubulares ou de chapa.

### **Radiadores**

Os **radiadores tubulares** ligam a lateral inferior, a lateral superior do tanque do transformador. No interior dos radiadores tubulares passa o óleo dissipando o calor para o ambiente externo. Cumpre assim a necessidade de aumento da superfície do tanque em contato com o ambiente. Conforme pode ser visto na figura abaixo.



**Figura 25.** Transformador com radiadores tubulares.

Os **radiadores de chapa ou achatados** têm a mesma finalidade do radiador tabular, porém com a vantagem de utilizar maior quantidade de radiador ocupando menor espaço que o radiador tubular ocuparia. Nesse radiador o óleo passa por um tubo achatado com maior área e menor espessura por seu interior dissipando o calor para o ambiente externo. Conforme figura a seguir:





**Figura 26.** Transformador radiador de chapas com conservador de óleo.

Os transformadores também podem ter uma **ventilação forçada** por meio de ventiladores, esse é um artifício muito utilizado para **aumentar a capacidade dos transformadores em 25 a 30%**, devido ao melhor resfriamento de suas partes internas. Um transformador de 20MVA pode trabalhar sem problemas com 26MVA quando está submetido à **ventilação forçada**.



**Figura 27.** Transformador com radiador de chapas e ventilação forçada.

### **Conservador de líquido isolante ou tanque de expansão**

Nos transformadores com tanque de expansão o líquido isolante deve preencher completamente o tanque do transformador, assim o “colchão de ar” é transferido para o tanque do conservador.

Por este motivo o tanque de expansão ou conservador fica acima do tanque do transformador, em unidades superiores a 750kVA.

Reservatório de sílica gel acima(dourado).

Reservatório de expansão, logo abaixo.



**Figura 28.** Transformador com radiador de chapas e Tanque de Expansão.



### Reservatório de sílica gel ou secador de ar

Este reservatório é ligado ao tanque de expansão para possibilitar a respiração do transformador decorrente da variação de temperatura do líquido isolante.

Para evitar a contaminação do líquido isolante, a umidade contida no ar, a sílica gel tem papel higroscópico, ou seja, retém a umidade do ar que entra no transformador durante a inspiração, devido à pressão negativa interna.



Figura 29. Reservatório de sílica-gel ou secador de ar.

### Terminais

**Em pequenos transformadores**, destinados a baixa tensão, em geral os terminais são constituídos por pequenas alças metálicas fixas normalmente sobre o isolamento da bobina. Essas alças se ligam às extremidades dos enrolamentos.

**Em transformadores de maior porte**, as extremidades dos enrolamentos são ligadas aos terminais por meio de fios ou barras de cobre de acordo com o tamanho do aparelho. Esses terminais são fixos em isoladores de porcelana, adaptados à caixa ou ao tanque através de dispositivos especiais, formando o conjunto denominado de bucha do transformador.

**Para tensões muito elevadas** as buchas são preenchidas com óleo ou são constituídas por diversas camadas de papel de estanho que é um condutor e papel isolante impregnado com verniz de baquelita em torno do condutor do terminal e envolvido pela porcelana, que é um material isolante.

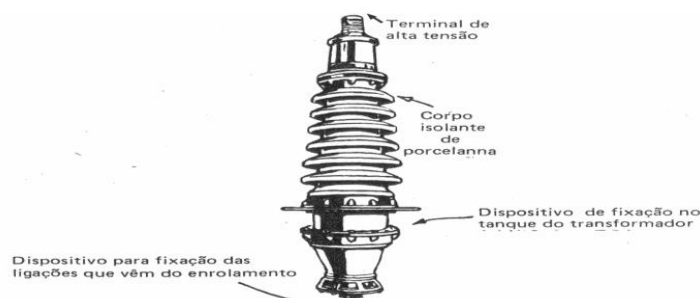


Figura 30. Bucha do transformador

### Tipos de óleo isolante

O líquido isolante utilizado nos transformadores é o óleo mineral, a função desse óleo é a de **isolação e resfriamento**. O óleo mineral é um isolante melhor que o ar.

Os transformadores de distribuição, com tensão acima de 1,2kV, são construídos de maneira a trabalharem imersos em óleos isolantes.

Os óleos isolantes possuem dupla finalidade: garantir isolação entre os componentes do transformador e dissipar para o exterior o calor gerado nos enrolamentos e no núcleo.

Para que o óleo possa cumprir satisfatoriamente as duas condições acima, deve estar perfeitamente livre de umidade e outras impurezas para garantir seu alto poder dielétrico. É considerado bom, o óleo com rigidez dielétrica superior a 30kV/mm.

### **Óleo mineral de base naftênica**

O de base naftênica (tipo A), utilizado em equipamentos para tensões superiores a 145kV.

### **Óleo mineral de base parafínica**

O de base parafínica (tipo B), é usado em equipamentos com tensão igual ou inferior a 145kV.

### **Óleo de silicone**

Existem também, fluidos isolantes à base de silicone, recomendados para áreas de alto grau de segurança. Ao contrário dos óleos minerais, este tipo de fluido possui baixa inflamabilidade, reduzindo sensivelmente uma eventual situação de incêndio. Pois no caso de combustão do óleo, forma-se na superfície uma camada de sílica extinguindo a chama.

### **Óleo vegetal isolante para transformadores**

É usado também o óleo **Rtemp** que é um óleo vegetal isolante de alto ponto de fulgor com características semelhantes ao silicone.

A utilização do óleo vegetal isolante **Envirotemp** e **Biovolt** é recente no mercado. Tem por vantagem além de ser biodegradável possuir alto ponto de fulgor. Tem, porém a desvantagem de ser altamente oxidante na presença de oxigênio, necessitando de inibidores, sendo preferencialmente utilizado em transformadores selados.

### **Perdas no transformador.**

A energia no primário é transferida para o secundário, mas parte dessa energia é dissipada em forma de calor **no cobre** (condutores do primário e secundário) e **no ferro** (correntes parasitas ou de Foucault e Histerese). Para reduzir estas perdas haverá necessidade de resfriamento do transformador ou instalá-lo em local bem ventilado.

As correntes induzidas no interior da massa de ferro, recebem o nome de **corrente de Foucault**. Devido ao efeito joule estas correntes produzem calor e gera perda de energia. Grande parte da energia recebida pelo enrolamento primário é consumida no interior do transformador, reduzindo o seu rendimento. Entretanto, sendo o núcleo constituído por lâminas delgadas e eletricamente isoladas umas das outras, conseguem-se reduzir as correntes de Foucault e suas perdas correspondentes.

**Histerese** corresponde a uma perda de energia que ocorre sempre que se cria ou que se faz desaparecer um campo magnético no interior de um material magnético.

### **Perdas no cobre**

As perdas no cobre representam a energia dissipada nos condutores dos enrolamentos. A perda no cobre varia com a carga do transformador. Ao passar corrente nos enrolamentos, há perdas de energia por efeito Joule, a equação seguinte calcula a potência dissipada no cobre:  $P=R.I^2$ .

**Em resumo as perdas de potência de um transformador podem ser assim distribuídas:**

**a) Perda no núcleo** – Calor causado por correntes parasitárias;

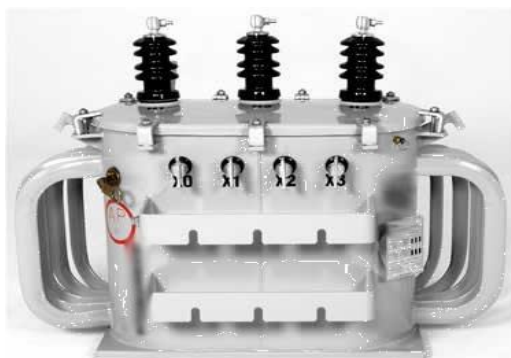
**b) Perdas magnéticas** – Causadas por linhas de força que não transferem energia para o secundário;

**c) Perda na bobina** – Perdas em forma de calor que é desenvolvido na bobina em decorrência da sua resistência ôhmica.

**Localização dos terminais dos transformadores.**

Conforme a ABNT (Associação Brasileira de Normas e Técnicas), os terminais são denominados pela letra *H* seguida de um número; sendo que o número 0 (zero) corresponde ao terminal neutro e os números 1, 2 e 3 representam as fases. **Ex. H1, H2, H3, para o lado de alta tensão.**

O lado de baixa tensão B.T é denominado pela letra *X* seguido de um número, sendo que o número 0 (zero) corresponde ao terminal neutro e os números 1, 2 e 3 representam as fases. **Ex. X0, X1, X2, X3.**



**Figura 31.** Localização dos terminais do transformador.

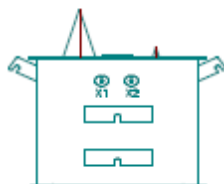
### **Classificação quanto ao número de fases**

Os transformadores são construídos com o número de fases necessário ao atendimento das cargas que serão atendidas.

Podem ser:

#### **(a) Monofásico**

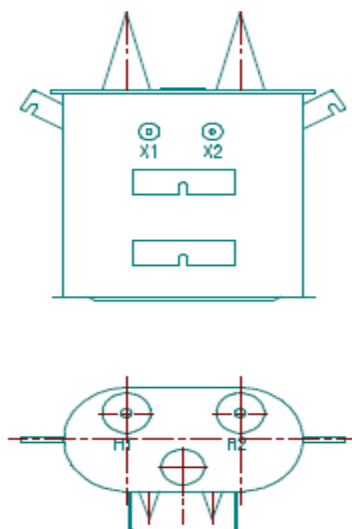
Estes são construídos para potências inferiores a 100kVA e utilizados para consumidores rurais e residenciais. Possuem uma bucha no primário e duas ou três no secundário. Operam com uma bucha ligada a uma fase e outro terminal aterrado.



**Figura 32.** Transformador monofásico com um terminal primário e com dois terminais secundários.

#### **(b) Bifásico**

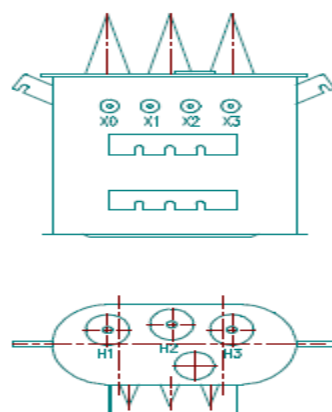
Estes são utilizados para consumidores rurais e residenciais monofásicos. Possuem duas buchas no primário e duas ou três no secundário. Operam com as duas buchas ligadas fase-fase ou também com uma ligada ao condutor fase e outro terminal ligado à terra.



**Figura 33.** Transformador bifásico com dois terminais primários e com dois secundários.

### (c) Trifásico

Estes são mais utilizados nos sistemas de distribuição, transmissão e no atendimento de cargas industriais.



**Figura 34.** Transformador trifásico e indicação dos terminais de AT e BT.

### Tensão de linha e tensão de fase no secundário dos transformadores

Os transformadores da rede pública normalmente tem o seu primário ligado em triângulo e seu secundário ligado em estrela. E esses terminais do secundário não são representados por N, R, S, T e nem por A, B, C. Essas representações são substituídas por:

N por X0      N por X0

R por X1    ou    A por X1

S por X2      B por X2

T por X3      C por X3

As tensões entre X0 e X1, X0 e X2, X0 e X3 são **tensões de fase**.

As tensões entre X1 e X2, X1 e X3, X2 e X3 são **tensões de linha**.

Exemplos:

1) A tensão  $U$  entre os terminais  $X0$  e  $X1$  de um transformador é de 127V, calcule a tensão  $U$  entre os terminais  $X2$  e  $X3$ .

Solução:

$U_{X2 \text{ e } X3}$  = tensão de linha ( $U_L$ )

$U_{X0 \text{ e } X1}$  = tensão de fase ( $U_F$ )

$$U_L = U_F \cdot \sqrt{3}$$

$$U_{X2 \text{ e } X3} = U_{X0 \text{ e } X1} \cdot \sqrt{3}$$

$$U_{X2 \text{ e } X3} = 127 \cdot \sqrt{3}$$

$$U_{X2 \text{ e } X3} = 127,1,732$$

$$U_{X2 \text{ e } X3} = 220V$$

2) tensão  $U$  entre os terminais  $X1$  e  $X2$  de um transformador é de 660V, calcule a tensão  $U$  entre os terminais  $X0$  e  $X1$ .

Solução:

$U_{X0 \text{ e } X1}$  = tensão de fase ( $U_F$ )

$U_{X1 \text{ e } X2}$  = tensão de linha ( $U_L$ )

$$U_F = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

$$U_{X0 \text{ e } X1} = \frac{U_{X1 \text{ e } X2}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{X0 \text{ e } X1} = \frac{660}{1,732}$$

$$U_{X0 \text{ e } X1} = 381V$$

**Ligações usuais em transformadores trifásicos.**

Neste caso os enrolamentos, primário e secundário, podem ser ligados da forma como apresentado no quadro abaixo:

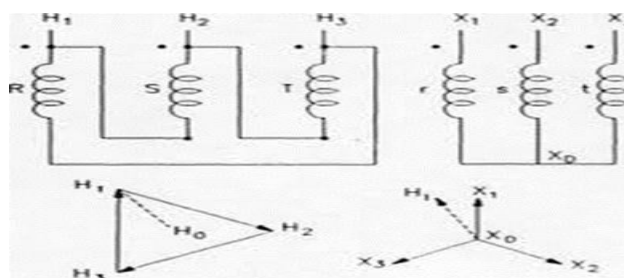


Figura 35. Primário do transformador ligado em triângulo e secundário ligado em estrela.

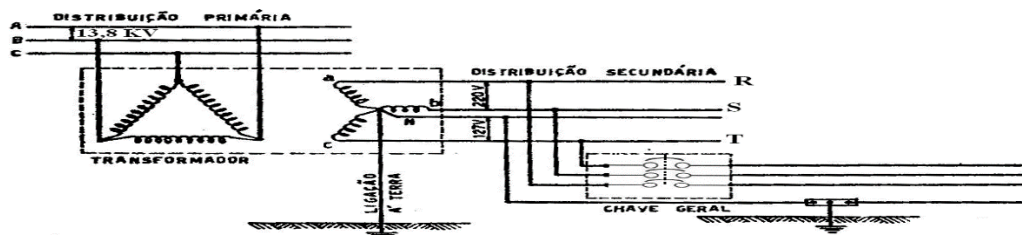


Figura 36. Aterramento feito no enrolamento secundário do transformador e no condutor neutro da propriedade do consumidor.

### **Transformadores de aterramento**

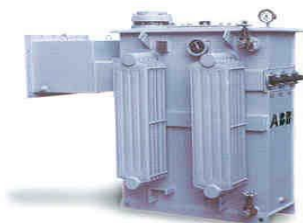
Utiliza-se o transformador de aterramento (ou reator trifásico de aterramento) em sistemas trifásicos sem neutro, tendo em vista prover um neutro acessível, no qual o sistema possa ser aterrado.



**Figura 37.** Tranformador de aterramento.

### **Transformadores subterrâneos**

Os transformadores subterrâneos encontram aplicação em zonas urbanas densamente construídas. Sua instalação deve ser executada em câmaras subterrâneas especialmente preparadas. Deve sofrer pressurização com nitrogênio com a finalidade de evitar a umidade.



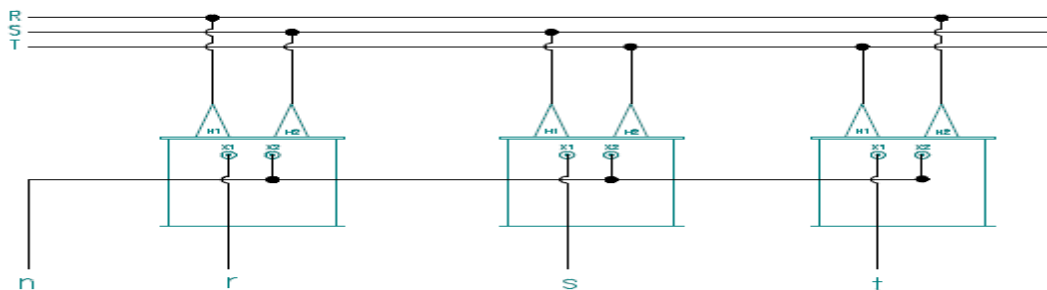
**Figura 38.** Tranformador subterrâneo.

### **Classificação de transformadores em função das diferentes aplicações**

- a) **De potencial** – Para medição de alta tensão;
- b) **De corrente** – Para medição de alta intensidade de corrente;
- c) **De força** – Para alimentação em geral.

### **Banco de transformação trifásico.**

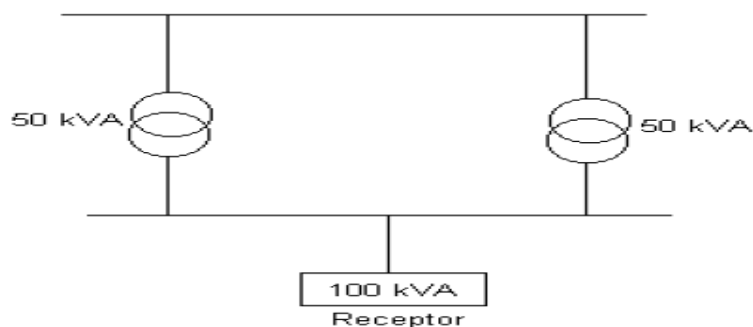
Os transformadores monofásicos em unidades individuais podem ser ligados de forma a constituírem bancos trifásicos para atenderem a cargas trifásicas. A potência do banco é a soma das potências dos três transformadores monofásicos que compõe o banco.



**Figura 39.** Banco de transforma trifásico com três transformadores monofásicos.

### **Agrupamentos de transformadores em paralelo**





**Figura 40.** Dois transformadores de 50KVA em paralelo.

O agrupamento de transformadores em paralelo é de suma importância nos sistemas elétricos de potência, as principais vantagens desse agrupamento são as seguintes:

- a) **Maior confiabilidade do sistema** - Caso ocorra defeito em um dos transformadores, o outro permanece alimentando a carga.
- b) **Possibilidade de manutenção sem desligamento do sistema** - Há possibilidade de realizar manutenção em um dos transformadores sem que as cargas sejam desligadas.
- c) **Expansão do sistema** – possibilidade de aumento da capacidade do sistema acrescentando um ou mais transformadores para aliviar o que esteja no limite de carga, sem necessidade da mudança por transformador de maior potência.

Como vimos, há grandes vantagens em colocar transformadores em paralelo, entretanto, é necessário obedecer algumas condições para que o paralelismo seja feito com segurança e confiabilidade. Estas condições são mostradas a seguir:

- 1- Mesma sequência de fase.
- 2- Mesmo módulo das tensões do primário e secundário (inclusive derivações).
- 3- Mesma Impedância do transformador.
- 4- Mesma defasagem ou deslocamento angular.

Se estas condições forem seguidas à risca, se pode fazer o paralelismo de dois ou mais transformadores sem problemas.

### Exercícios de Fixação

- 1) O transformador trata-se de um dispositivo de corrente alternada que opera baseado nos princípios eletromagnéticos, Lei de Faraday e da Lei de Lenz. O que afirma a Lei de Faraday e o que afirma a Lei de Lenz?
- 2) O funcionamento de um transformador baseia-se nos fenômenos de indutância mútua entre dois circuitos eletricamente isolados e magneticamente acoplados. O que é necessário para que a ligação magnética entre os dois circuitos seja a melhor possível?
- 3) Qual a função do núcleo do transformador?
- 4) Quais materiais são utilizados na construção do núcleo do transformador? E qual a função desses materiais?
- 5) Os enrolamentos de A.T e B.T têm construções diferentes. Quais são as diferenças entre esses dois enrolamentos?
- 6) Qual é a relação de transformação de um transformador com as seguintes características:

$E_1 = 1000V$  ;  $E_2 = 2000V$  ;  $n_1 = 100$  espiras ;  $n_2 = 200$  espiras.

7) Calcule a tensão no secundário de um transformador nas seguintes condições:

$E_1 = 100V$ ;  $I_1 = 10A$ ;  $I_2 = 5A$ .

8) O que são TAPS ?

9) Nesse exemplo, se for aplicada no enrolamento primário uma tensão de 1000v, quais serão as tensões entre os taps AB, AC e AD?

10) Porque o núcleo do transformador é laminado?

11) Cite vantagens e desvantagens dos núcleos dos tipos envolvidos e envolventes.

12) Quais os tipos de perdas no transformador e como elas acontecem?

13) Quais os tipos de resfriamento do transformador.

14) Qual a função do óleo mineral e dos radiadores em um transformador?

15) Em resumo como podem ser distribuídas as perdas de potência de um transformador?

16) Conforme a ABNT como são denominados os terminais de alta tensão e os de baixa tensão em um transformador?

17) Quanto ao número de fases como os transformadores são classificados?

18) Como são representadas as tensões de fase e as tensões de linha do secundários dos transformadores?

19) A tensão  $U$  entre os terminais  $X_0$  e  $X_2$  de um transformador é de 127V, calcule a tensão  $U$  entre os terminais  $X_1$  e  $X_3$ .

20) A tensão  $U$  entre os terminais  $X_1$  e  $X_2$  de um transformador é de 660V, calcule a tensão  $U$  entre os terminais  $X_0$  e  $X_3$ .

21) Onde é utilizado o transformador de aterramento?

22) O agrupamento de transformadores em paralelo é de suma importância nos sistemas elétricos de potência, as principais vantagens desse agrupamento são as seguintes:

23) Quais são as condições para se colocar transformadores em paralelo?

*Referências:*

*MÁQUINAS E INSTALAÇÕES ELÉTRICAS I*

*Elaboração e montagem: Eng. Eletricista Dêdison Santos Moura*

*Coordenação e Revisão: Prof. Fernando José de Azevedo*

*MÓDULO DE ELETRICIDADE*

*Paulo Sérgio Geambastiani*

<https://docplayer.com.br/docs-images/63/49468223/images/16-1.jpg>

<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/lei-faraday.htm>