

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
SANTA CATARINA
Campus Araranguá**

TRANSFORMADORES

CURSO TÉCNICO EM ELETROMECCÂNICA

Prof. Eng. Eletricista João Francisco Veremzuk Xavier

AGRADECIMENTO ao Prof. Tirson A de O Soares por gentilmente ter cedido este material.

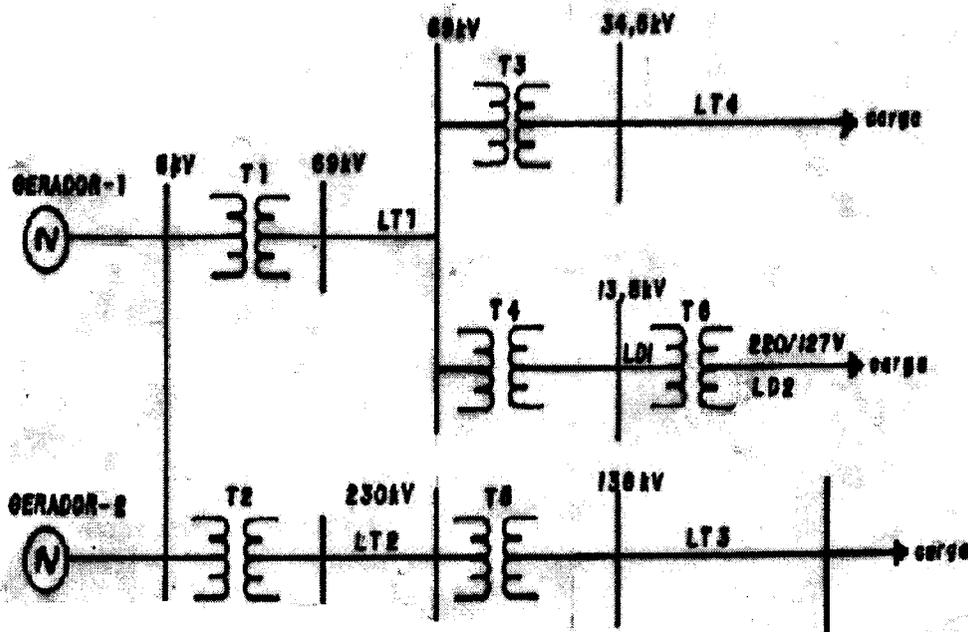
SUMÁRIO

1	Introdução	3
2	Definição de Transformadores	3
3	Leis e Conceitos Fundamentais	4
4	Princípio de Funcionamento	6
5	Relações do Transformador	7
6	Termos principais utilizados para transformador	9
7	Exercícios	27
8	Operação a vazio em transformadores	31
9	Determinação dos parâmetros de resistência, reatância e impedância	34
10	Operação em Curto circuito	36
11	Perdas adicionais	43
12	Regulação de tensão em transformadores	43
13	Polaridade em transformadores	45
14	Características de instalação	51
15	Operação em paralelo de transformadores	51
16	Exercícios	57
17	Energização de transformadores	58
18	Cálculo de um pequeno transformador monofásico	66
19	Exercícios	91
20	Referência bibliográfica	97

TRANSFORMADORES

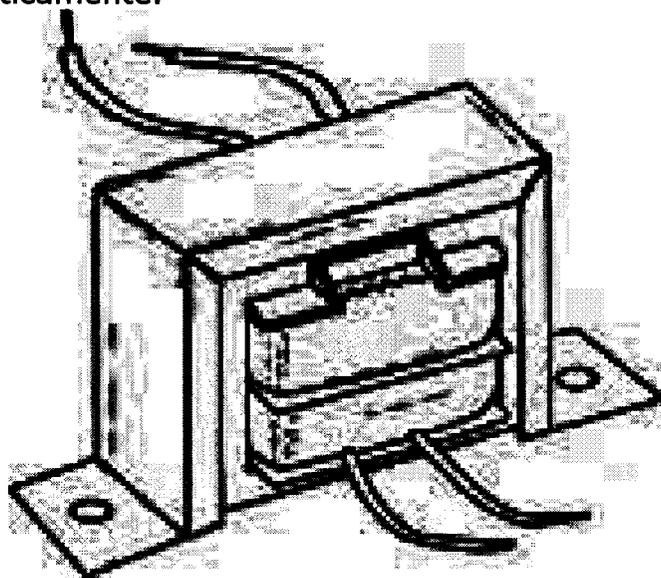
1. INTRODUÇÃO

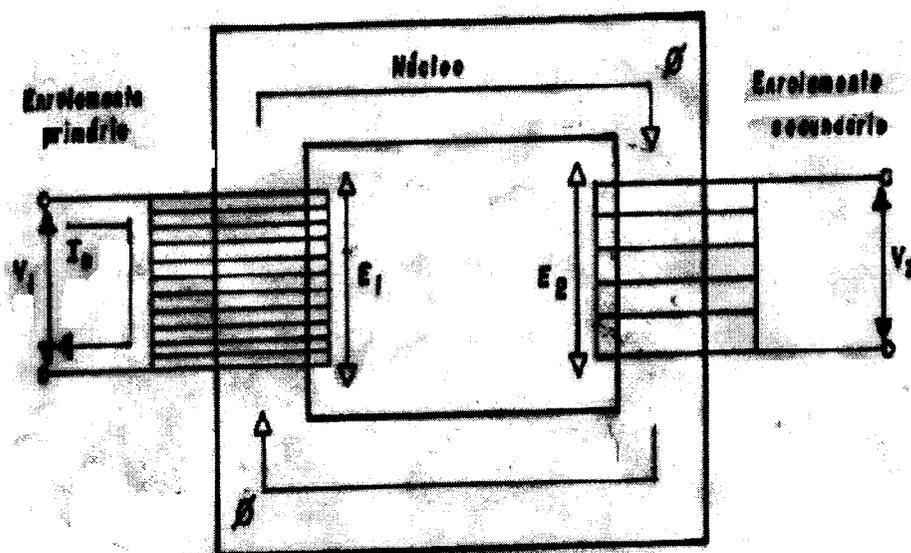
O aumento do consumo de energia implica diretamente no aumento da capacidade de geração.



2. DEFINIÇÃO DE TRANSFORMADOR:

É um equipamento estático que transfere energia entre seus enrolamentos, provocando a variação dos valores de tensão e corrente, mantendo os valores de potência e de frequência constantes. Constituído de dois enrolamentos e um núcleo, que os interliga magneticamente.





3. LEIS E CONCEITOS FUNDAMENTAIS:

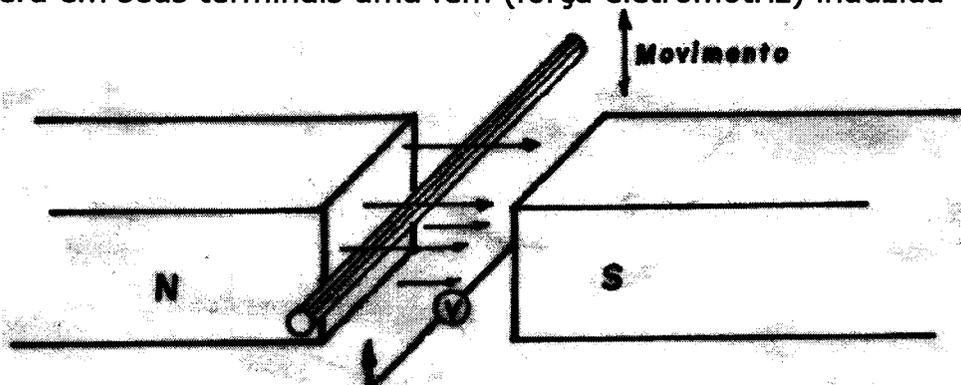
3.1 EXPERIÊNCIA DE OERSTED:

“Todo condutor percorrido por uma corrente elétrica, cria em torno de si um campo magnético”.



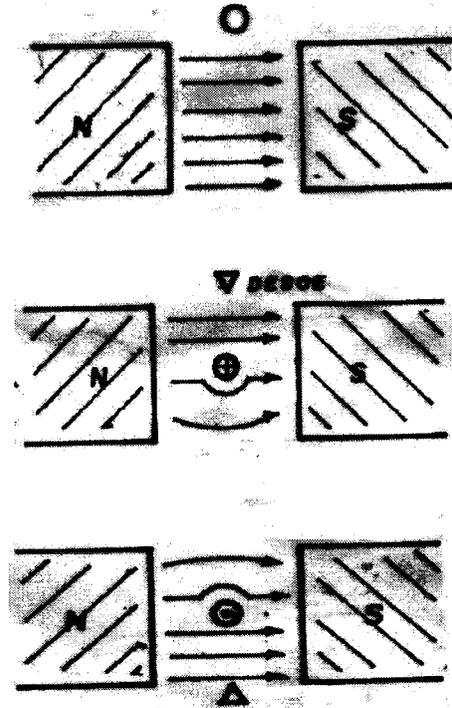
3.2 LEI DE FARADAY:

“Todo condutor mergulhado em um campo magnético variável, terá em seus terminais uma fem (força eletromotriz) induzida”.



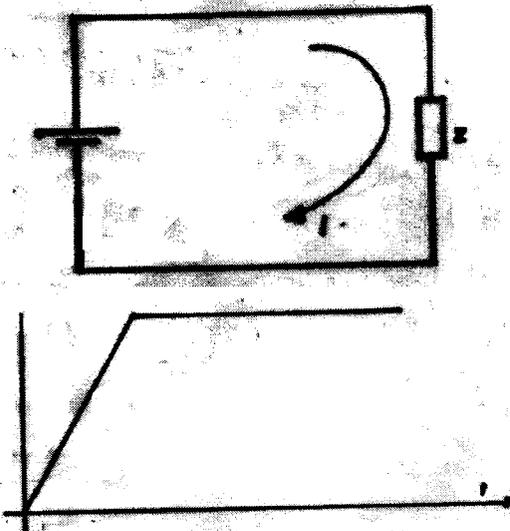
3.3 LEI DE LENZ:

"A corrente que aparece em um circuito elétrico fechado, em função de uma fem (força eletromotriz) induzida, tem sentido tal a anular a causa que lhe deu origem".



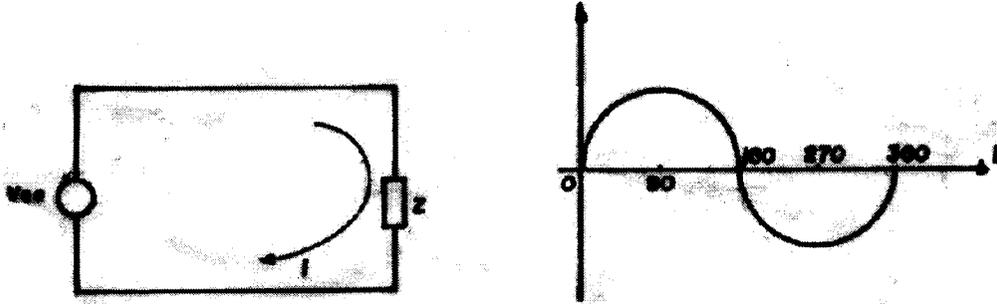
3.4 CORRENTE CONTÍNUA:

É a corrente que passa através de um condutor ou de um circuito elétrico somente em um sentido. Uma fonte de tensão contínua pode variar o valor de sua tensão de saída, mas se a polaridade for mantida, a corrente fluirá somente em um sentido.



3.5 CORRENTE ALTERNADA:

São correntes que possuem picos positivos e negativos, passando por um valor nulo num intervalo de tempo.



4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO:

Aplica-se uma tensão alternada (V_1) ao enrolamento primário do transformador representado na figura abaixo. Verifica-se que o enrolamento primário é um circuito elétrico fechado, aparecendo então uma corrente I_0 , denominada de corrente de excitação. Esta corrente cria no enrolamento primário um fluxo (Φ_m), conforme prediz a experiência de Oersted, que circulará pelo caminho de menor relutância oferecida pelo núcleo, cortando assim o enrolamento secundário.

Se I_0 for alternado, o fluxo produzido será variável, o que provocará no enrolamento secundário o aparecimento de uma fem (força eletromotriz) induzida, conforme prevê a Lei de Faraday.

Observe que para facilitar a explicação, consideramos que:

- O transformador é ideal, isto é, sem perdas internas;
- O secundário está em aberto (sem carga), logo sem circulação de corrente.

5. EXERCÍCIO:

Explique com suas palavras o funcionamento de um transformador:

6. RELAÇÕES DO TRANSFORMADOR

$$P_1 = P_2 \quad V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Das Leis do Eletromagnetismo tira-se:

$$V = 10^{-8} \cdot \omega \cdot \emptyset_m \cdot N \quad \text{onde } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$V = 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \emptyset_m \cdot N$$

Então:

$$V_1 = 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \emptyset_{m1} \cdot N_1 \quad (\text{primário})$$

$$V_2 = 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot \emptyset_{m2} \cdot N_2 \quad (\text{secundário})$$

$$\text{Como } f_1 = f_2 = f \quad \text{e} \quad \emptyset_{m1} = \emptyset_{m2} = \emptyset_m$$

Então:

$$V_1 = 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \emptyset_m \cdot N_1 \quad (1)$$

$$V_2 = 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \emptyset_m \cdot N_2 \quad (2)$$

Dividindo (1) por (2) teremos:

$$\underline{V_1 = 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \emptyset_m \cdot N_1}$$

$$V_2 = 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \emptyset_m \cdot N_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

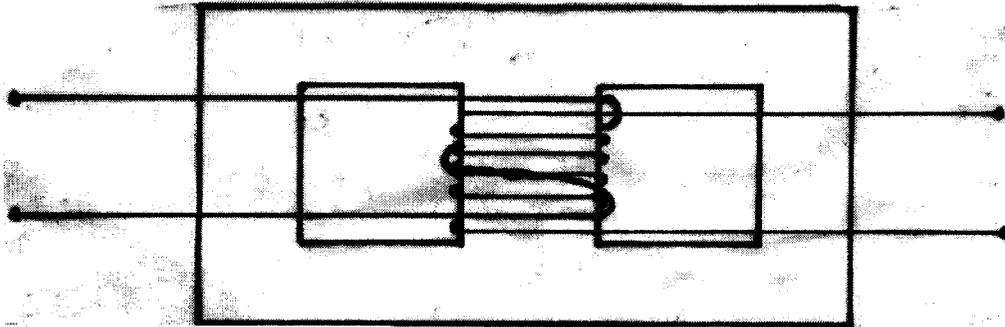
7. Exercícios:

- 7.1 Em um transformador, o lado primário possui uma tensão de 220 volts e uma corrente de 6 Ampéres, enquanto que o lado secundário possui uma corrente de 32 Ampéres. Pede-se o valor da tensão no lado secundário deste transformador.
- 7.2 Com 2500 espiras e uma tensão de 127 volts no lado primário de um transformador, o lado secundário possuirá uma tensão de 12 volts, pede-se o número de espiras do lado secundário.
- 7.3 Um transformador possui no seu lado secundário 450 espiras e uma corrente de 55 Ampéres. Qual será a corrente no lado primário se este transformador possuir 4.500 espiras neste mesmo lado?

8. TERMOS PRINCIPAIS UTILIZADOS EM TRANSFORMADORES

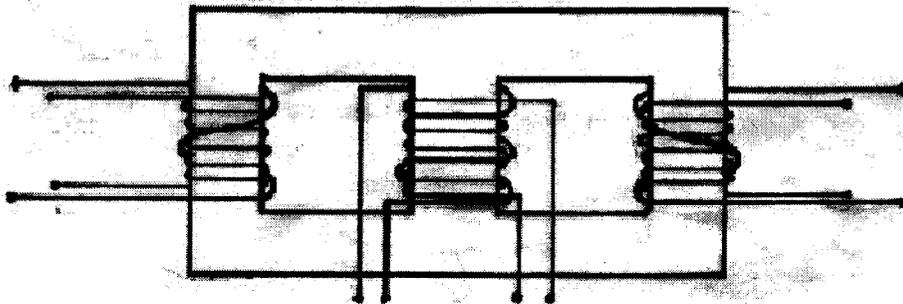
8.1 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO:

São transformadores que possuem apenas um conjunto de bobinas de Alta e Baixa tensão colocado sobre um núcleo.



8.2 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO:

São transformadores que possuem três conjuntos de bobinas de Alta e Baixa tensão colocadas sobre um núcleo. O funcionamento é idêntico a um transformador monofásico, uma vez que a sua constituição é de três transformadores monofásicos entre si.



8.3 TENSÃO NOMINAL:

São valores de tensão projetados e especificados pelo fabricante para funcionamento adequado do equipamento. Sempre que se for ligar um transformador devemos observar as suas tensões nominais e compará-las com tensões de linha e de carga para não danificar qualquer elemento do circuito.

8.4 ENROLAMENTO PRIMÁRIO:

É o enrolamento do transformador que recebe a energia.

8.5 ENROLAMENTO SECUNDÁRIO:

É o enrolamento do transformador que fornece a energia a uma carga.

8.6 ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO (AT):

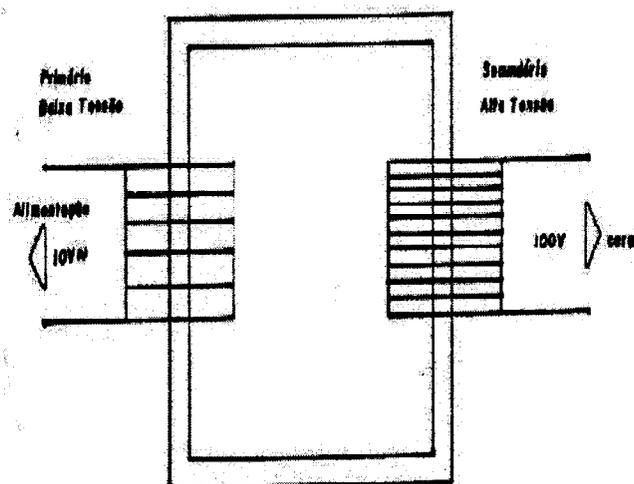
É o enrolamento do transformador que possui maior valor de tensão nominal.

8.7 ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO (BT):

É o enrolamento do transformador que possui menor valor de tensão nominal.

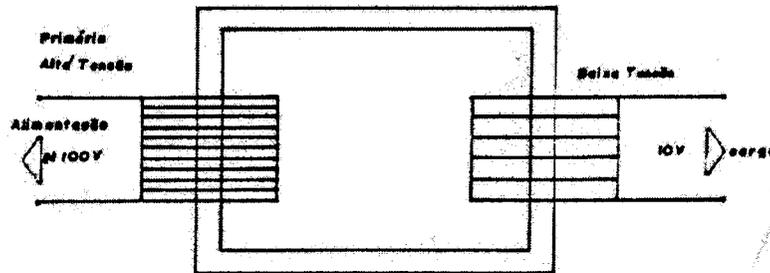
8.8 TRANSFORMADOR ELEVADOR:

São os transformadores que elevam os valores de tensão recebidos, isto é, o enrolamento primário coincide com o enrolamento de baixa tensão.



8.9 TRANSFORMADOR ABAIXADOR:

São os transformadores que abaixam os valores de tensão recebidos, isto é, o enrolamento primário coincide com o enrolamento de alta tensão.



8.10 POTÊNCIA APARENTE (S):

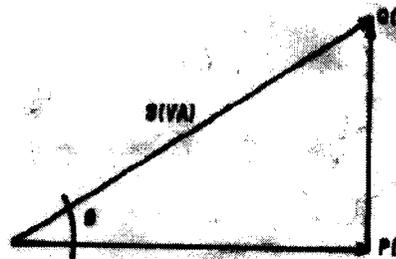
É a soma vetorial das potências ativas e reativas, é fornecida em VA, KVA, MVA.

$$S_{\text{mono}} = V \cdot I$$

$$S_{\text{trifásico}} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$$

Φ = defasamento

$\cos \Phi$ = fator de potência



9.11 POTÊNCIA ATIVA (P):

É a potência que realmente é transformada em trabalho, é fornecida em W, KW, MW.

$$P_{\text{mono}} = V \cdot I \cdot \cos \Phi$$

$$P_{\text{trifásico}} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \Phi$$

9.12 POTÊNCIA REATIVA (Q):

É a potência que não produz trabalho mecânico, porém é obrigatoriamente consumida por máquinas possuidoras de enrolamentos, é fornecida em Var, Kvar, MVar.

$$Q_{\text{mono}} = V \cdot I \cdot \text{sen } \Phi$$

$$Q_{\text{trifásico}} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \text{sen } \Phi$$

9.13 Exercícios:

9.13.1 Calcule as potências em um sistema monofásico que possui uma tensão de 220 volts, uma corrente de 1,4 Amperes e um fator de potência de 0,94.

9.13.2 Calcule as potências em um sistema trifásico, onde possui uma tensão de 380 volts, uma corrente de 60 Amperes com um defasamento de 10° .

9.13.3 Calcule S, P e Q para um sistema trifásico que possui as seguintes características:

$$V = 380 \text{ volts}$$

$$I = 90 \text{ Ampéres}$$

$$\cos \Phi = 0,89$$

9.14 POTÊNCIA NOMINAL:

É a máxima potência que pode ser transferida do enrolamento primário para o enrolamento secundário sem danos ao equipamento. Esta potência é especificada pelo fabricante e deve ser contida na placa de identificação. É fornecida em VA, KVA, MVA.

9.15 CORRENTE NOMINAL:

É o valor de corrente que circula em um enrolamento quando o transformador estiver trabalhando com potência e tensão nominal.

9.16 FREQUÊNCIA NOMINAL:

É a frequência para qual o equipamento foi projetado e fabricado. No caso do Brasil é de 60 Hz.

9.17 CLASSE DE ISOLAMENTO:

É a classe que determina o valor da temperatura que os componentes do transformador devem suportar sem sofrerem alterações em suas características. É dada em $^{\circ}\text{C}$.

Classe (°C)	Designação	Materiais representativos da chave
90	O	Algodão, seda, papel não impregnados
105	A	Algodão, seda, papel impregnado, imersos em líquido isolante
130	B	Mica, fibra de vidro, epóxi
155	F	Mica, fibra de vidro
180	H	Elásticos de silicone, mica, fibra de vidro
Acima de 180	C	Porcelana, mica, vidro, quartzo, material orgânico

9.18 CLASSE DE TENSÃO DE ISOLAMENTO:

É a classe que determina o valor de tensão que os componentes devem suportar sem danos as suas características iniciais. É dado em KV. Exemplo: a tensão de alimentação do transformador de distribuição é de 13,8 KV e a classe de tensão de isolamento é de 15 KV.

9.19 CORRENTE DE EXCITAÇÃO:

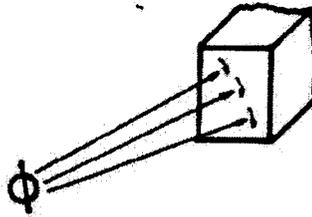
É a corrente que circula em um enrolamento do transformador quando este é alimentado com sua tensão nominal e o outro enrolamento está aberto. É representado por I_0 e é dada em % da corrente nominal, sendo responsável pela produção do fluxo magnético e suprir perdas no núcleo. Ela não deve ser superior a 6% da corrente nominal.

9.20 CORRENTES PARASITAS OU CORRENTES DE FOUCAULT:

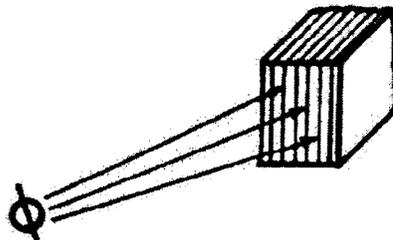
Sendo o núcleo feito de um material condutor e este mergulhado em um campo magnético variável, segundo a Lei de Faraday, nele deverá induzir forças eletromotrizes. Considerando o núcleo como um circuito fechado, nele aparecem correntes que são chamadas de correntes parasitas.

Estas correntes, por sua vez provocam perdas por aquecimento no núcleo. Para reduzirmos o valor desta corrente devemos aumentar a resistência elétrica a sua laminação e isolação das chapas. Pode-se

também com este intuito adicionar 4% de silício a composição das chapas.



Correntes Parasitas



Núcleo Laminado

9.21 HISTERESE:

Por facilidade tomaremos um corpo supostamente constituído de pequenos ímãs elementares. Assim, cada vez que o corpo for colocado na presença de um campo magnético, suas partículas tenderão a orientar-se. Como o núcleo do transformador está mergulhado em um campo magnético variável suas partículas tenderão a orientar-se constantemente. Este movimento provocará aquecimento no choque entre as partículas, bem como consumo de energia para a orientação. A este fenômeno chamamos de histerese. Podem-se reduzir os efeitos da histerese com o uso de chapas especiais de grão orientado.



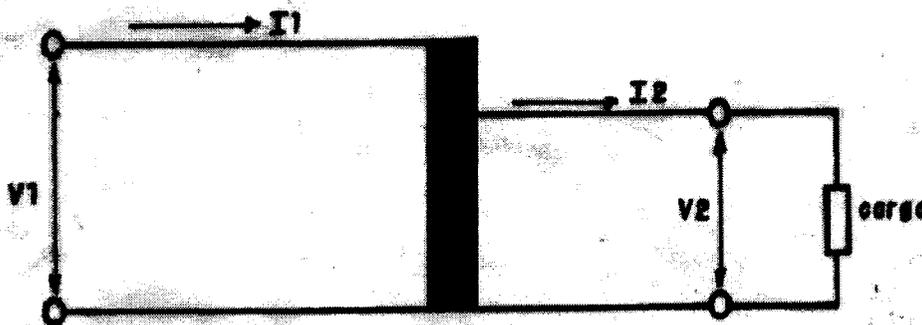
Corpo não estando na presença de campo magnético



Corpos com suas partículas orientadas conforme o sentido do campo magnético

9.22 AUTOTRANSFORMADOR:

Um transformador pode ser constituído por um único enrolamento, sendo assim o primário coincide com o secundário. Este tipo de transformador denomina-se de autotransformador e é representado abaixo. Ele possui maior rendimento e pequenas perdas de capacidade em KVA, porém se usados para grandes variações de tensão, estaremos sacrificando os itens de isolamento do primário e secundário.



Um autotransformador pode ser feito variável e consiste num único enrolamento feito sobre um núcleo toroidal. Neste caso ele é chamado varivolt e tem uma escova de carvão em um eixo rotativo que faz contato com as espiras expostas do enrolamento.

9.23 RENDIMENTO:

É a relação entre a potência que uma máquina fornece e a potência que a mesma recebe, podendo ser dado por:

$$\eta = \frac{\text{Potência Secundária}}{\text{Potência Primária}} \times 100\%$$

Os transformadores são os aparelhos que apresentam os maiores rendimentos.

Exercício:

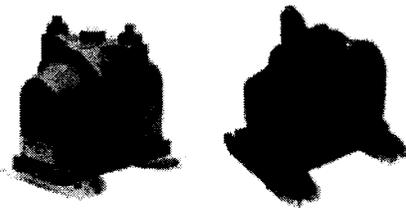
9.23.1 O rendimento de um transformador de 20 KVA, 1200 V / 120V é máximo a 50% da carga nominal e vale então 98%. Calcule:

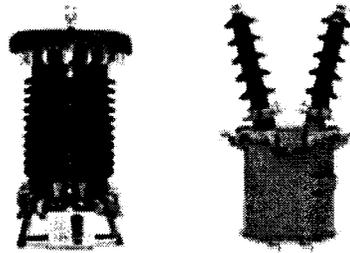
- a) As perdas no núcleo;
- b) O rendimento a plena carga;
- c) O rendimento para carga de 75% e 125 %;

9.24 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (TP):

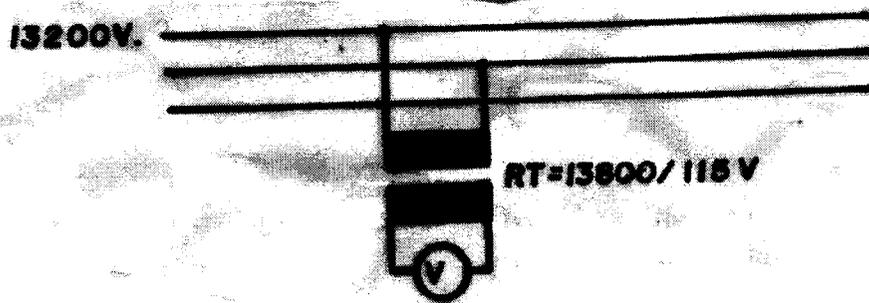
É para uso específico para interligação de equipamentos de baixo valor de potência.

Os TP's são projetados para uma tensão secundária nominal de 115 volts, embora possa ser encontrados TP's com tensão secundária nominal de 120 volts.





Exemplo: Determinar a indicação obtida em um voltímetro ligado a um TP, de relação de transformação 13.800/115 V, se o primário estiver ligado a uma rede de 13.200 volts.



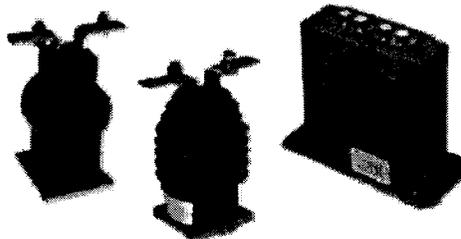
Montando uma regra de três:

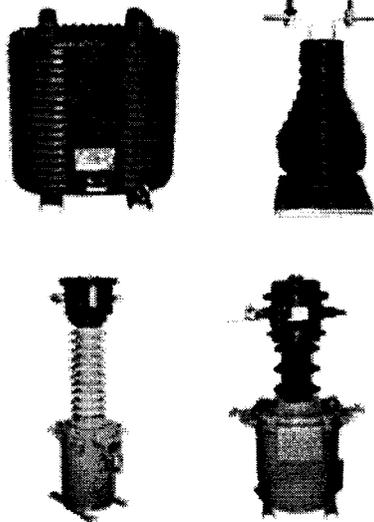
13.800115

13.200 x x = 110 volts, logo a leitura será de 110 volts

9.25 TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC):

É para uso específico para interligação de instrumentos de medida e relés de proteção. A sua construção é um pouco diferente dos transformadores convencionais, uma vez que nele nos interessa a relação entre a corrente do primário e a corrente do secundário. O TC terá o primário ligado em série com a carga e o secundário com uma corrente nominal de 5 Amperes, ligado a um equipamento de medida ou proteção.





Exemplo: Um amperímetro ligado ao secundário de um TC de relação de transformação 200/5 A, indica uma leitura de 3,75 Ampéres, qual a corrente que circula pela linha?



Montando uma regra de três:

200 5

x 3,75

x = 150 Ampéres, logo a corrente na linha é de 150 Ampéres.

9.26 Parte Ativa:

É o conjunto formado pelo núcleo e bobinas de um transformador.

9.27 TRANSFORMADOR A ÓLEO:

Os transformadores comumente utilizados são do tipo imerso em óleo mineral, extraído do petróleo. Esses transformadores estão

colocados em tanques cheios de óleo com radiadores para aumentar a circulação do óleo, por convecção e a superfície irradiadora do calor. Os enrolamentos são compactados com as bobinas, isoladas e colocadas ao redor das pernas do núcleo.

As ligações do transformador devem ser realizadas de acordo com o diagrama de ligação de sua placa de identificação. **É importante que se verifique se os dados da placa de identificação estão coerentes com o sistema ao qual o transformador vai ser instalado.**

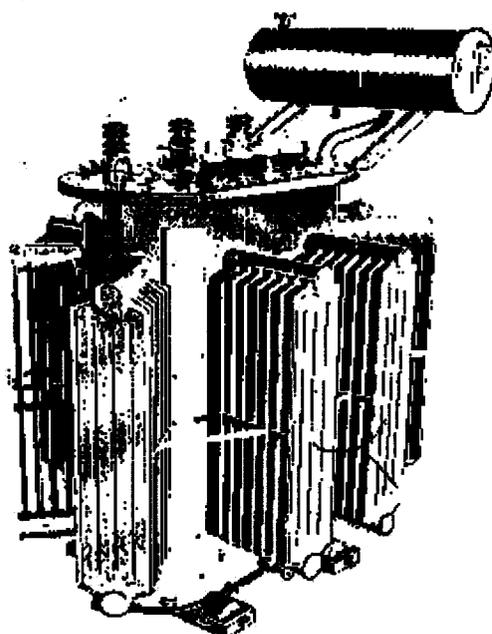
As ligações das buchas deverão ser bem apertadas, cuidando para que nenhum esforço seja transmitido aos terminais, o que viria ocasionar afrouxamento das ligações, mau contato e posteriores vazamentos por sobreaquecimento no sistema de vedação.

Com a finalidade de adequar a tensão do transformador à tensão de alimentação, o transformador é dotado de derivações (tap's) que podem ser escolhidos mediante a utilização de um painel de ligações ou comutador. Conforme projeto e tipo construtivo, este aparato é fixado junto à parte ativa, dentro do tanque. Podendo ser acionamento externo ou acionamento interno. Para fazer-se o acionamento interno. Deve-se abrir a janela de inspeção para executar a comutação. Para o acionamento externo a comutação é feita diretamente no manípulo existente na tampa. Em ambos os casos o transformador deverá estar desenergizado.

O tanque deverá ser **efetiva e permanentemente aterrado**. Uma malha de terra permanente de baixa resistência é essencial para uma proteção adequada.

No tanque está previsto um ou dois conectores para aterramento.

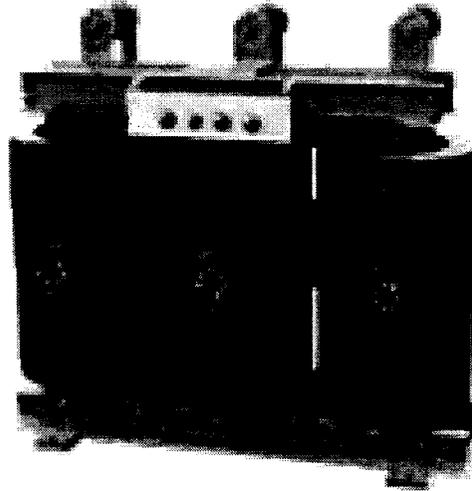
A malha de terra deverá ser ligada a esses conectores por meio de um cabo nu de cobre de bitola adequada e a mais curta possível.



9.28 TRANSFORMADOR A SECO:

Neste caso, o transformador não tem líquido isolante, são constituídos segundo os mesmos princípios que os transformadores isolados com óleo, porém, não há líquido isolante. Os materiais isolantes dos enrolamentos são substituídos por outros de maior resistência ao calor e os enrolamentos ficam expostos.

Pode haver uma proteção mecânica, constituída por um invólucro com aberturas para permitir a circulação do ar por convecção térmica a fim de esfriar o enrolamento.



9.29 IMPEDÂNCIA:

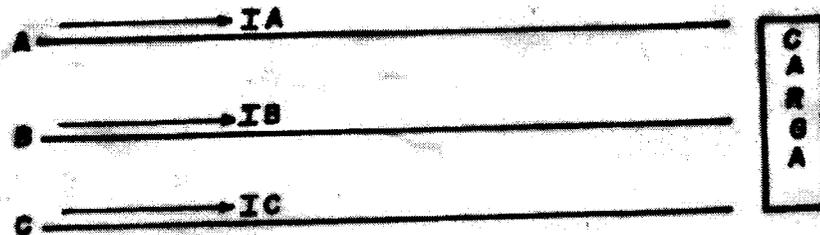
É um valor percentual, que indica a queda de tensão produzida internamente em um transformador, dando-nos também a idéia das perdas internas.

9.30 POLARIDADE:

É a marcação existente nos terminais (dos enrolamentos) dos transformadores indicando o sentido da circulação de corrente em um determinado instante em consequência do sentido do fluxo produzido.

9.31 CORRENTE DE LINHA (I_L):

É a corrente que circula na rede de alimentação do circuito, independe da conexão deste circuito.

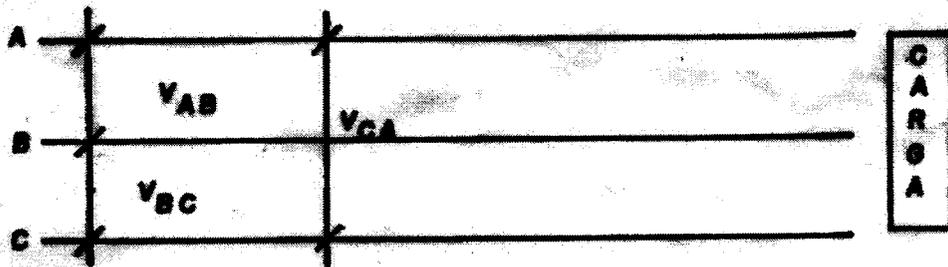


9.32 CORRENTE DE FASE (I_F):

É a corrente que circula no elemento de um circuito, logo depende da conexão deste circuito.

9.33 TENSÃO DE LINHA (V_L):

É a tensão entre duas linhas na rede de alimentação do circuito, independe da conexão deste circuito.



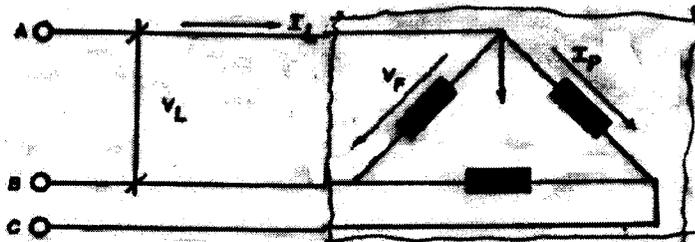
9.34 TENSÃO DE FASE (V_F):

É a tensão aplicada sobre o elemento do circuito, logo depende da conexão feita.

9.35 CONEXÃO TRIÂNGULO (Δ):

$$V_L = V_F$$

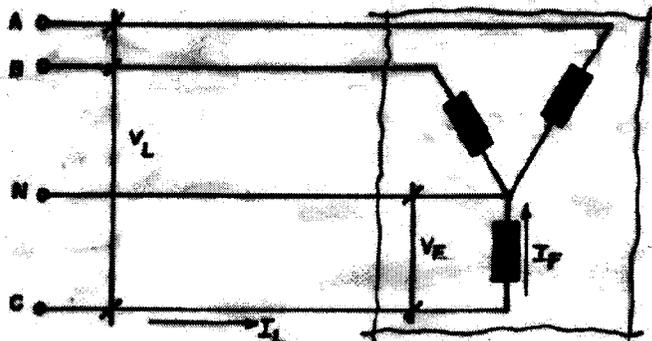
$$I_L = I_F \cdot \sqrt{3}$$



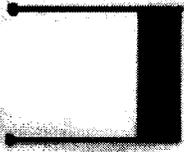
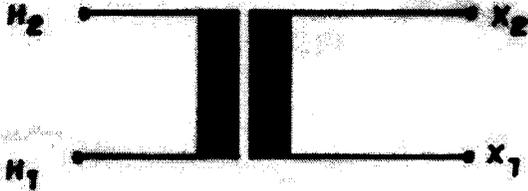
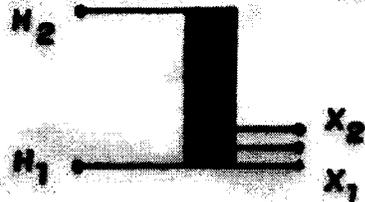
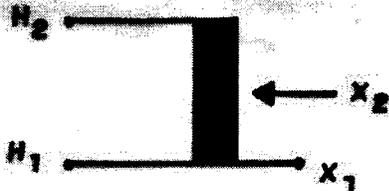
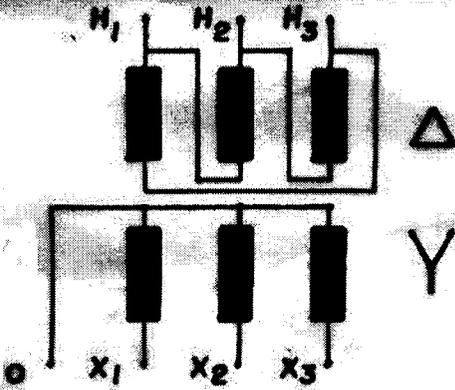
9.36 CONEXÃO ESTRELA (Y):

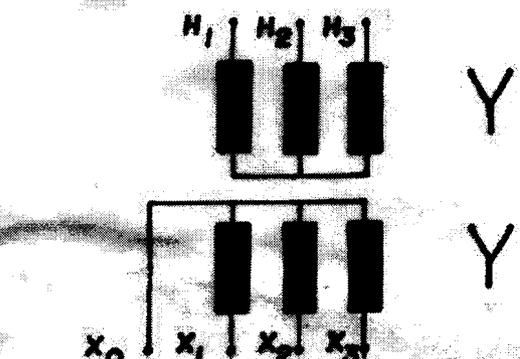
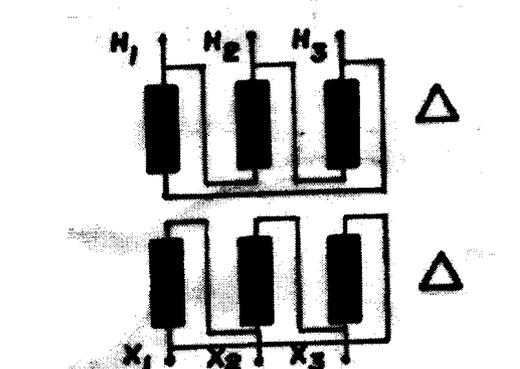
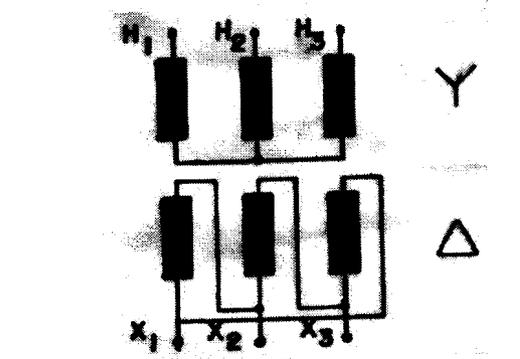
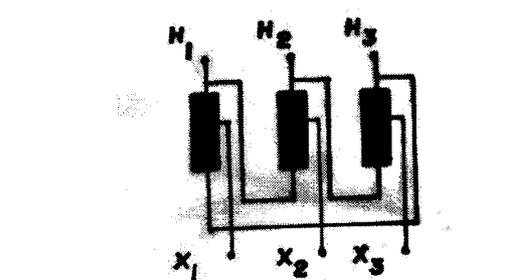
$$V_L = V_F \cdot \sqrt{3}$$

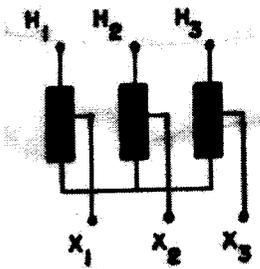
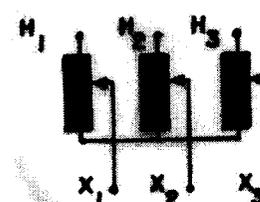
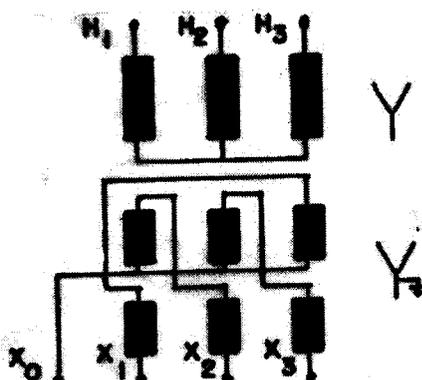
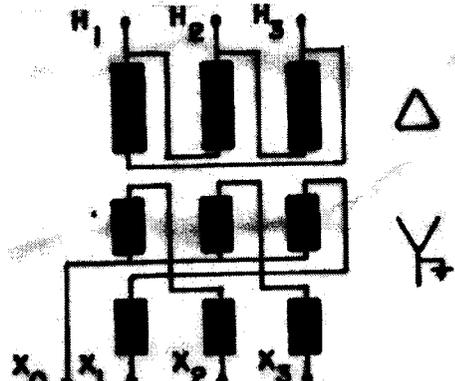
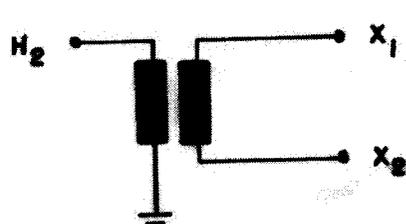
$$I_L = I_F$$



8.37 SIMBOLOGIA:

Designação	Forma de Ligação
Bobina	
Transformador Monofásico	
Auto-transformador Monofásico	
Variador de Tensão Monofásico (Varivolt Monofásico)	
Transformador Trifásico Ligado em Triângulo-Estrela	

<p>Transformador Trifásico Ligado em Estrela-Estrela</p>	
<p>Transformador Trifásico Ligado em Triângulo-Triângulo</p>	
<p>Transformador Trifásico Ligado em Estrela-Triângulo</p>	
<p>Auto-Transformador Trifásico Ligado em Triângulo</p>	

<p>Auto-Transformador Trifásico Ligado em Estrela</p>	
<p>Variador de Tensão Trifásico Ligado em Estrela (Varivolt Trifásico)</p>	
<p>Transformador Trifásico Ligado em Estrela- Zig Zag</p>	
<p>Transformador Trifásico Ligado em Triângulo-Zig Zag</p>	
<p>Transformador Monofásico de Distribuição Rural</p>	

10. EXERCÍCIOS:

10.1 O transformador é uma máquina estática que transfere energia de um enrolamento para outro variando _____

_____ e _____.

10.2 Todo condutor mergulhado em um campo magnético variável tem em seus terminais um fem (força eletromotriz) induzida, é conhecida como _____

10.3 O transformador é composto basicamente por _____

10.4 A tensão aplicada no elemento chama-se _____

10.5 O enrolamento de BT (baixa tensão) possui _____ seção com _____ número de espiras.

10.6 O valor de tensão que os componentes devem suportar sem sofrerem danos é conhecido como _____

10.7 Quando um autotransformador tem o secundário variável é chamado de _____

10.8 A relação $P_{SAIDA}/P_{ENTRADA}$ nos fornece o _____

10.9 O enrolamento que nos fornece energia é chamado de _____

10.10 O transformador projetado para funcionar com três fases é chamado de _____

10.11 O componente que possui todos os dados do equipamento é _____

10.12 O enrolamento que recebe energia chama-se de _____

10.13 Um transformador com relação 12/220 volts é chamado de _____

10.14 A potência que realmente produz trabalho é chamada de _____

10.15 O transformador de corrente tem secundário de _____ A.

10.16 As perdas no núcleo do transformador são provenientes de _____
_____ e _____.

10.17 O enrolamento de BT (baixa tensão) possui menor valor de _____

10.18 A corrente no secundário de um TC (transformador de corrente) é de _____

10.19 O enrolamento de AT (alta tensão) possui _____
corrente _____ seção.

10.20 A tensão especificada para trabalho pelo fabricante é denominada de _____

10.21 O primário de um TP (transformador de potencial) é ligado em _____ com a rede.

10.22 Em um transformador _____ as perdas são nulas.

10.23 A corrente necessária para ter início aos fenômenos de indução é chamada de _____

10.24 A corrente que circula no transformador a plena carga é chamada de _____

10.25 A proporção entre a tensão de entrada e a tensão de saída é chamada de _____

10.26 O transformador é uma máquina estática porque _____

10.27 Correntes que aparecem no núcleo em função do campo magnético variável são chamadas de _____

10.28 A placa de identificação contem _____

10.29 Transformador abaixador é aquele _____

10.30 O autotransformador tem _____

10.31 O transformador que possui o enrolamento primário junto com o secundário chama-se de _____

10.32 Todo condutor percorrido por uma corrente cria em torno de si um campo magnético, isto é chamado de _____

10.33 A modificação da orientação das pequenas partículas no interior do núcleo provocam perdas por _____

10.34 Relação de transformação é chamada de _____

10.35 A corrente contínua é _____ durante todo o tempo.

10.36 Em um sistema estrela:

$V_L =$ _____

$I_L =$ _____

10.37 Potência nominal é chamada de _____

10.38 Classe de isolamento é o que chamamos de _____

10.39 O transformador com relação 220/24 volts é chamado de _____

10.40 Em um sistema triangulo:

$V_L =$ _____

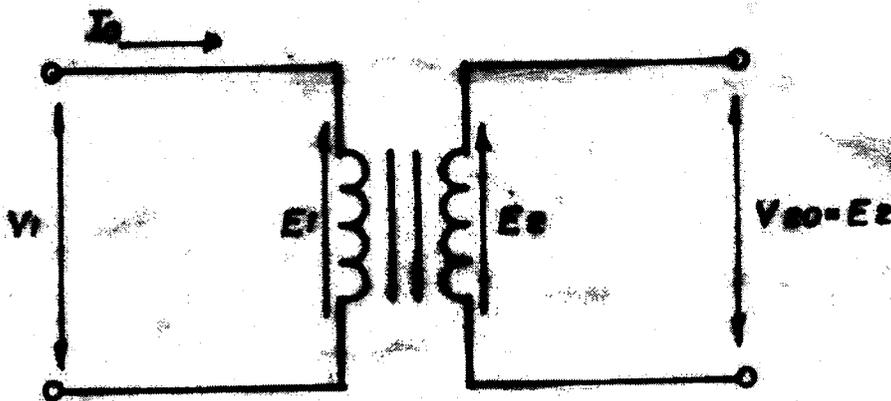
$I_L =$ _____

10.41 Para reduzir as correntes parasitas devemos _____

_____ o núcleo.

11. EQUAÇÕES DE TRANSFORMADORES NO MODELO IDEAL:

Consideremos o modelo ideal do transformador:



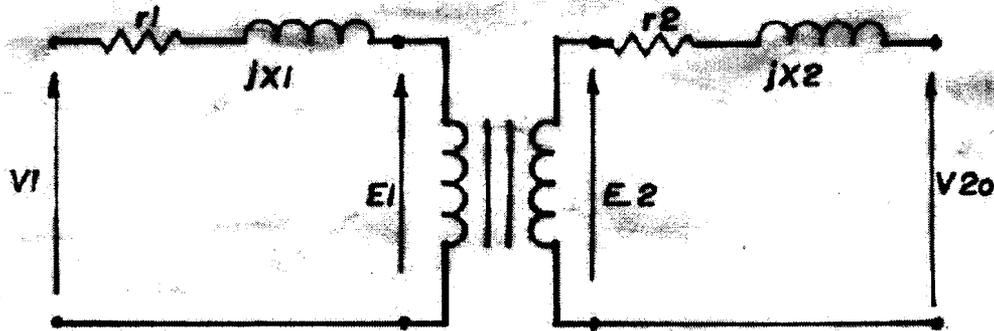
Neste modelo temos as seguintes relações:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = k$$

$$P_1 = P_2$$

12. EQUAÇÕES DO TRANSFORMADOR NO MODELO REAL

O modelo real do transformador leva em consideração a resistência do fio de cobre tanto do circuito secundário como primário e a reatância de dispersão magnética primária e secundária.



Onde:

r_1 → resistência do enrolamento primário;

x_1 → reatância de dispersão do enrolamento primário = $2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1$

E_1 → fem (força eletromotriz) induzida no primário;

r_2 → resistência do enrolamento secundário;

x_2 → reatância de dispersão do enrolamento secundário = $2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_2$

E_2 → fem (força eletromotriz) induzida no secundário.

Para o circuito primário, tem-se:

$$V_1 = (r_1 + jx_1)I_1 + E_1$$

No qual se faz: $r_1 + jx_1 = Z_1$

Onde:

Z_1 → Impedância do enrolamento primário.

Para o circuito secundário:

$$E_2 = (r_2 + jx_2) I_2 + V_2$$

No qual se faz: $r_2 + jx_2 = Z_2$

Onde:

$Z_2 \rightarrow$ Impedância do enrolamento secundário

13. OPERAÇÃO A VAZIO EM TRANSFORMADORES

No caso particular que o transformador se encontra em vazio, a corrente primária é muito baixa e a secundária é zero assim:

$$V_1 = (r_1 + jx_1)I_1 + E_1 \Rightarrow V_1 = E_1$$

$$E_2 = (r_2 + jx_2) I_2 + V_2 \Rightarrow V_2 = E_2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = k$$

14 DETERMINAÇÃO DOS PARAMETROS:

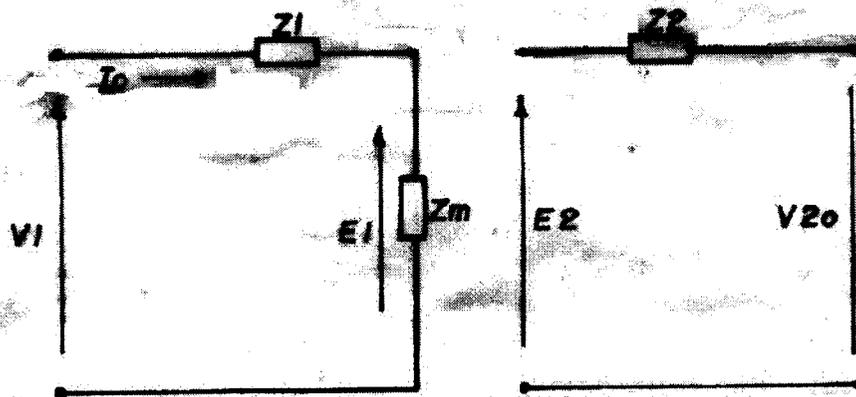
$R_m \rightarrow$ Resistência de magnetização;

$X_m \rightarrow$ Reatância de magnetização;

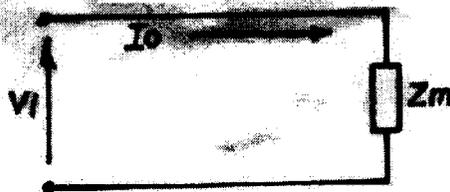
$Z_m \rightarrow$ Impedância de magnetização.

Na figura abaixo, representamos o circuito equivalente de um transformador, onde as reatâncias correspondem aquelas devido ao fluxo de dispersão. Para a produção do fluxo principal, considera-se a existência de uma bobina representada pela reatância X_m . Um outro problema que aparece se refere às perdas no núcleo, pois no circuito equivalente não aparece nenhum elemento que a represente. Para solucionar isso se introduz no ramo magnetizante uma resistência fictícia (R_m), que irá dissipar uma potência P_0 .

Essa resistência e a reatância podem ser representadas por uma impedância do ramo magnetizante Z_m , mas não nos dois enrolamentos simultaneamente.



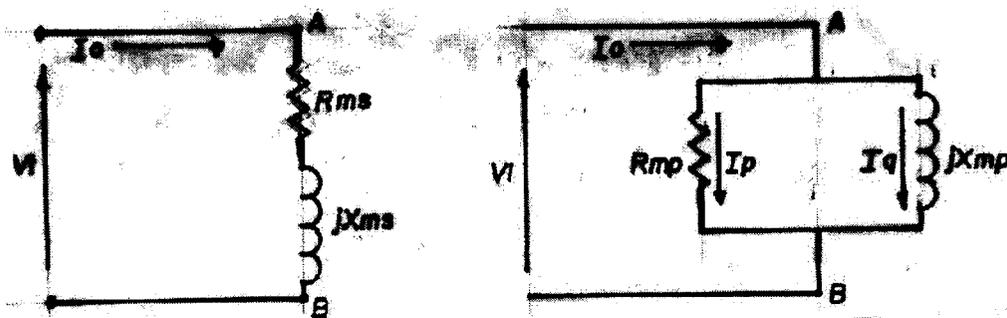
Para a determinação da impedância basta considerar que na condição de operação a vazio, sendo $I_0 Z_1 = 0$, o circuito ficaria resumido ao indicado na figura abaixo:



A partir disso, tem-se:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_0}$$

Em relação aos cálculos de R_m e X_m , deve-se considerar um dos circuitos abaixo:



a) Determinação de R_{ms} e X_{ms} :

$$P_0 = R_{ms} \cdot I_0^2$$

Do qual:

$$R_{ms} = \frac{P_0}{I_0^2}$$

Visto ser a conexão em série:

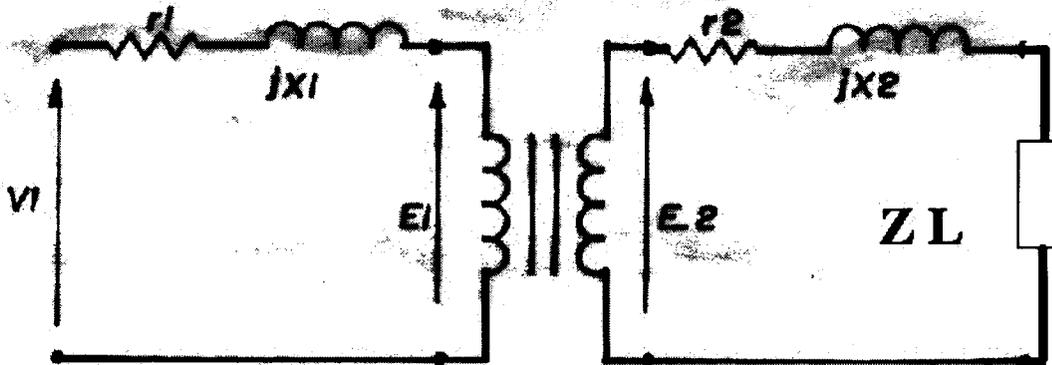
$$X_{ms} = \sqrt{Z_m^2 - R_{ms}^2}$$

b) Determinação de R_{mp} e X_{mp} :

$$R_{mp} = \frac{V_1}{I_p} = \frac{P_0}{I_p^2}$$

$$X_{mp} = \frac{V_1}{I_q}$$

15. MODELO REAL DE TRANSFORMADOR COM CARGA



Circuito primário

$$V_1 = (r_1 + jx_1)I_1 + E_1$$

Circuito secundário

$$E_2 = (r_2 + jx_2) I_2 + V_2, \text{ neste caso } V_2 = I_2 Z_L$$

Como $E_1 = kE_2$

Reescrevendo

$$V_1 = (r_1 + jx_1)I_1 + k \{(r_2 + jx_2) I_2 + I_2 Z_L\}$$

A corrente secundaria em termos da primaria

$$I_2 = kI_1$$

A expressão fica:

$$V_1 = (r_1 + jx_1)I_1 + k \{(r_2 + jx_2) kI_1 + kI_1 Z_L\}$$

Desenvolvendo a multiplicação

$$V_1 = (r_1 + jx_1)I_1 + (k^2 r_2 + j k^2 x_2)I_1 + k^2 I_1 Z_L$$

Somando a resistências e as reatâncias têm:

$$V_1 = I_1 \{(r_1 + k^2 r_2) + (jx_1 + j k^2 x_2) + k^2 Z_L\}$$

Onde:

$R_{e1} = (r_1 + k^2 r_2) =$ resistência equivalente referida ao primário

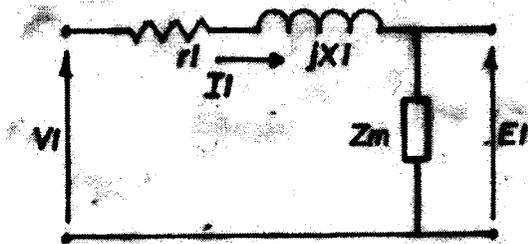
$X_{e1} = (jx_1 + j k^2 x_2) =$ resistência equivalente referida ao secundário

$Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1} =$ Impedância equivalente referida ao primário

$V_1 = I_1 (R_{e1} + jX_{e1})$

$V_1 = I_1 Z_{e1}$

16. TRANSFORMADOR COM CARGA REFLETIDA AO PRIMÁRIO



Circuito equivalente simplificado para um transformador com carga refletida ao primário

17. TRANSFORMADOR EM CURTO CIRCUITO

17.1 OPERAÇÃO EM CURTO CIRCUITO:

Objetivo: Possibilita a determinação de perdas no cobre (P_j); queda de tensão interna (ΔV) e impedância e reatância percentuais ($Z\%$, $R\%$, $X\%$).

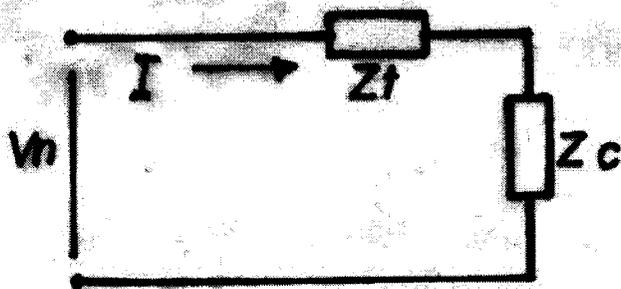
17.2 PERDAS NO COBRE (P_j):

Na determinação das perdas nos enrolamentos que são por efeito **joule**, notamos que elas dependem da carga elétrica alimentada pelo transformador. Isto sugere que se deva estabelecer um certo ponto de funcionamento (ou uma certa corrente fornecida) para a determinação de $r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$. Tal ponto é fixado como o correspondente ao funcionamento nominal do transformador.

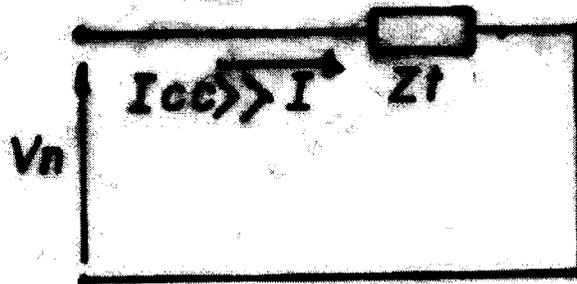
Para o conhecimento das referidas perdas, podem-se determinar r_1 e r_2 e conectar em seguida a carga nominal ao transformador para a medição de I_1 e I_2 . Essas correntes poderiam ser obtidas pelos dados de placa de potência e tensão.

Pelas figuras a e b observamos que estando o secundário curto-circuitado, a tensão necessária para a circulação das correntes nominais é bem inferior ao correspondente valor nominal. Assim a tensão necessária para a realização do ensaio apresenta valores, geralmente de até 10% da tensão nominal (V_n) do enrolamento alimentado. Esta tensão necessária para a circulação das correntes nominais corresponderá, aproximadamente a queda de tensão interna do transformador.

Supondo que a tensão de curto-circuito (V_{cc}) seja a décima parte da nominal, a indução no núcleo será reduzida de 10 vezes. Com isto, as perdas por histerese ficarão reduzidas de 40 vezes e as correntes parasitas de 100, o que leva a conclusão de que as perdas no núcleo podem ser desprezadas face aquelas no cobre.

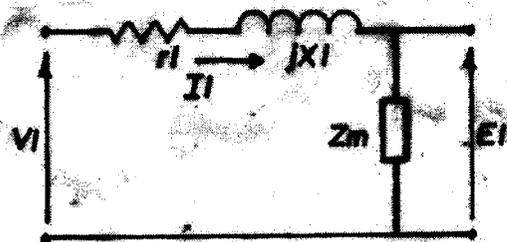


Em carga



Em Curto-Circuito

Portanto, fazendo circular as correntes nominais no transformador sob ensaio de curto-circuito, praticamente toda a potência fornecida ao transformador estaria sendo perdida por efeito **joule** nos dois enrolamentos. Toda potência absorvida é consumida internamente, uma vez que a saída está em curto.

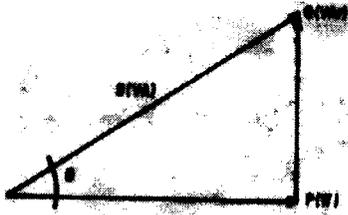


Circuito equivalente simplificado para um transformador com secundário em curto.

Como vemos na condição de curto circuito

$$V_1 = I_1 Z_{e1}$$

$$Z_{e1} = V_1/I_1$$



$$R_{e1} = \frac{V_1 \cos \theta}{I_1} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta}{I_1^2} = \frac{\text{Potencia ativa primaria}}{\text{corrente primaria}}$$

Ligações típicas de instrumentos para ensaio de curto-circuito, visando determinar Z_{e1} , x_{e1} e r_{e1} .

Note que a tensão de entrada é reduzida pelo transformador ajustável.

$Z_{e1} = V_1/I_1$; leitura do voltímetro / leitura da corrente primaria.

$R_{e1} = P_1/I_1^2$; leitura do watímetro / leitura da corrente primaria ao quadrado.

Para calcular a reatância equivalente:

$$X_{e1}^2 = Z_{e1}^2 - R_{e1}^2$$

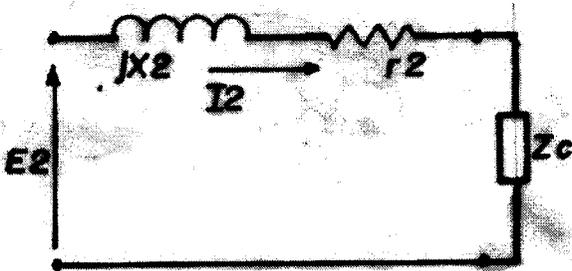
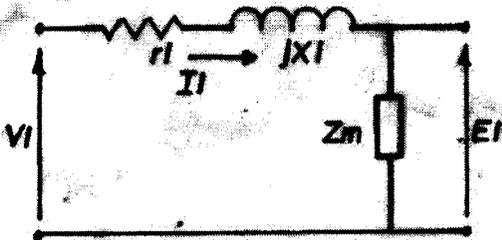
Para calcular o ângulo θ

$$\theta = \text{Arc cos}(R_{e1}/Z_{e1})$$

18. REGULAÇÃO DE TENSÃO NUM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

18.1 QUEDA DE TENSÃO (ΔV):

A figura abaixo apresenta o circuito equivalente de um transformador, observa-se que haverá uma queda de tensão no primário que, por sua vez, influenciará no valor de E_1 . Isso resultará em uma alteração do valor de E_2 . O produto $(r_2 + jx_2) I_2$ corresponderá a uma queda de tensão no secundário e assim a tensão no secundário V_2 relativo a V_1 sofrerá dois estágios de variação. Esse método para determinação de V_2 , se torna trabalhoso, o que se torna mais fácil à determinação pelos circuitos reduzidos.



Da mesma forma que se calculo a resistência equivalente R_{e1} e a reatância equivalente x_{e1} , valores referido ao circuito primário, é possível obter a impedância equivalente primaria referida ao secundário:

Resistência equivalente referida ao secundário

$$R_{e1} = (r_1 + k^2 r_2) / K^2 \text{ (dividendo ambos membros por } k^2 \text{)}$$

$$R_{e2} = R_{e1} / k^2 = r_2 + r_1 / k^2 = \text{Resistência equivalente referida ao secundário}$$

Reatância equivalente referida ao secundário

$$X_{e1} = (jx_1 + j k^2 x_2)/k^2 \text{ (dividendo ambos membros por } k^2)$$

$$X_{e2} = X_{e1}/k^2 = (jx_1 + j k^2 x_2)/k^2$$

Donde, a impedância equivalente referida ao secundário é

$$Z_{e2} = R_{e2} + jX_{e2}$$

Analisando as seguintes situações:

a) Cargas de fator de potencia unitário

b) Carga com fator de potencia em atraso

c) Carga com fator de potencia em adianto

A equação que representa as três situações é:

$$E_2 = (V_2 \cos \theta) + I_2 R_{e2} + j(V_2 \sin \theta \pm I_2 X_{e2})$$

18.2 Exercícios:

1) Calcule a tensão de entrada no primário de um transformador ensaiado a vazio com os seguintes parâmetros:

$$r_1 = 32 \, \Omega$$

$$f = 60 \, \text{Hz}$$

$$L_1 = 45 \, \text{mH}$$

$$I_0 = 3,2 + j4,6 \, \text{A}$$

$$E_1 = 276 - j 49 \, \text{V}$$

2) Calcule a fem (força eletromotriz) induzida no primário de um transformador ensaiado a vazio, onde foi aplicada uma tensão de entrada de $127 + j 100$ volts, dando os seguintes valores:

$$r_1 = 2,4 \, \Omega$$

$$x_1 = 32 \, \Omega$$

$$I_0 = 7,2 - j 5,6 \, \text{mA}$$

3) Calcule a corrente de excitação em um transformador ensaiado a vazio, onde foi aplicada uma tensão de entrada de $200 - j25$ volts, uma força eletromotriz induzida de $170 + j30$ volts tem-se uma resistência de 40 ohms e uma indutância de 200 mH.

4) Um transformador de 30 KVA, 240/120 V, 60 Hz, tem os seguintes dados:

$$r_1 = 0,14 \Omega, r_2 = 0,035 \Omega, X_1 = 0,22 \Omega \text{ e } X_2 = 0,055 \Omega.$$

È desejado que se tenha uma f.e.m induzida no primário igual, em módulo, à tensão nos terminais do primário quando o transformador fornece a corrente de plena carga. Despreze a corrente de magnetização. Como deve o transformador ser carregado para se obter este resultado?

5) Um transformador de 10 KVA, 60 Hz, 4800 / 240 V é ensaiado a vazio, sendo os resultados:

$$V_0 = 240 \text{ V}, I_0 = 1,5 \text{ A e } P_0 = 60 \text{ W}$$

Utilizando esses dados calcule a resistência e a reatância equivalentes relativas ao lado da A T.

6) Um transformador de 20 KVA, 660 V / 120 V tem perdas a vazio de 250 W e uma resistência do lado da A T de 0,2 Ohms. Imaginando que as perdas relativas à carga nos enrolamentos são iguais, calcule:

- a) A resistência do lado da BT;
- b) A perda no cobre equivalente à plena carga;

7) Um transformador de 10 KVA, 60 Hz, 4800 / 240 V é ensaiado em curto-circuito, respectivamente, sendo os resultados:

$$V = 180 \text{ V}, I = 2,08 \text{ A e } P = 180 \text{ W}$$

Utilizando esses dados calcule a resistência e a reatância equivalentes relativas ao lado da B.T.

8) Um transformador de 50 KVA, 660 / 240 V, 25 Hz tem 200 W de perdas no núcleo (das quais, 30% são perdas por correntes parasitas) e perdas no cobre à plena carga de 650 W. Se o transformador funciona a 600 V, 60 Hz, qual seria a nova capacidade do transformador se as perdas totais se mantivessem constantes .

9) Os dados do ensaio de curto-circuito para o lado de A T de um transformador de 20 KVA, 60 Hz , 230 V /20 V, são 4,5 V, 87 A e 250 W, calcule:

- a) A impedância equivalente referida ao lado de Alta; bobinas ligadas em série;
- b) A impedância equivalente referida ao lado de baixa; bobinas ligadas em série;
- c) A corrente secundária nominal; bobinas ligadas em série;

d) A corrente secundária se as bobinas são curto-circuitadas, com tensão nominal aplicada ao lado de alta tensão e a sobrecarga percentual produzida.

10) Justifique porque quando uma bobina enrolada sobre um núcleo de material ferromagnético é alimentada por tensão senoidal o núcleo precisa ser laminado ao contrário do que ocorre quando a alimentação é em corrente contínua em que o núcleo pode ser maciço.

11) Um transformador de 200/100 V, 60 Hz, tem uma impedância de $0,3 + j 0,8 \Omega$ no enrolamento de 200 V e uma impedância de $0,1 + j 0,25 \Omega$ no enrolamento de 100 V. Quais as correntes nos lados de alta e baixa se um curto-circuito ocorrer no lado de 100 V com 200 V aplicados no lado da alta tensão.

18.3 IMPEDÂNCIA PERCENTUAL ($Z\%$), RESISTÊNCIA PERCENTUAL ($R\%$) e REATÂNCIA PERCENTUAL ($X\%$):

Com a montagem do ensaio em curto-circuito, os instrumentos permitem a obtenção de:

P_{cc} → Potência fornecida ao transformador em curto;

V_{cc} → Tensão de curto-circuito medida no enrolamento de AT;

I_{1n}, I_{2n} → Correntes nominais nos dois enrolamentos.

Para este ensaio são válidos os circuitos equivalentes da figura 6

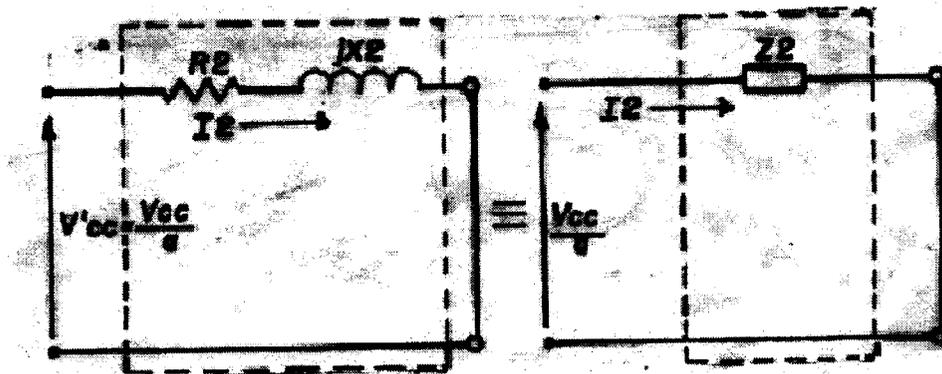


Figura 6 → Circuito equivalente para o transformador em curto-circuito.

Cálculo da resistência dos enrolamentos (R_2):

$$R_2 = P_{cc} / I_{2n}^2$$

Por esta expressão, determina-se o valor da resistência total referida ao secundário. Caso interesse a referida ao primário, basta substituir I_{2n} por I_{1n} . Desde que a potência primária e secundária é a mesma.

Assim define-se um novo parâmetro:

$$R\% = \frac{R_2 \cdot I_{2n}}{V_{2n}} \cdot 100 = \frac{R_1 \cdot I_{1n}}{V_{1n}} \cdot 100$$

Onde:

V_{1n} e V_{2n} → tensões nominais do primário e secundário.

I_{1n} e I_{2n} → correntes nominais do primário e secundário.

Substituindo $R_2 = \frac{P_{cc}}{I_{2n}^2}$ na expressão de $R\%$

$$R\% = \frac{P_{cc} \cdot I_{2n}}{V_{2n} \cdot I_{2n}^2} \cdot 100 = \frac{P_{cc}}{V_{2n} \cdot I_{2n}} \cdot 100$$

Como o produto $V_{2n} \cdot I_{2n}$ é igual à potência nominal do transformador:

$$R\% = \frac{P_{cc}}{S_n} \cdot 100$$

Da figura 6 tem-se que o módulo da impedância é equivalente referida ao secundário (Z_2) e pode ser calculada como:

$$Z_2 = \frac{V_{1cc}}{a \cdot I_{2n}}$$

Que de preferência, deve ser expressa em termos de seu valor percentual:

$$Z\% = \frac{Z_2 \cdot I_{2n}}{V_{2n}} \cdot 100 = \frac{Z_1 \cdot I_{1n}}{V_{1n}} \cdot 100$$

Substituindo Z_2 :

$$Z\% = \frac{V_{cc} \cdot I_{2n}}{a \cdot I_{2n} \cdot V_{2n}} \cdot 100 = \frac{V_{cc}}{a \cdot V_{2n}} \cdot 100$$

Lembrando que o produto $a \cdot V_{2n}$ é igual a V_{1n} :

$$Z\% = \frac{V_{cc}}{V_{1n}} \cdot 100$$

Considerando que:

$$Z^2\% = X^2\% + R^2\%$$

$$X^2\% = Z^2\% - R^2\%$$

20. PERDAS ADICIONAIS:

São perdas que existem além das nos enrolamentos: nas ferragens, nas cabeças de bobinas e outras.

Então:

$$P_{cc} = P_A + P_j$$

Para a obtenção de P_A é recomendado utilizar a relação:

$$P_A = 15\% \text{ a } 20\% P_0$$

P_j seria obtida por $r_1 I_{1n}^2 + r_2 I_{2n}^2$

21. POLARIDADE DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

A marcação da polaridade dos terminais dos enrolamentos de um transformador monofásicos indica, quais são os terminais positivos e negativos em um determinado instante, isto é, a relação entre os sentidos momentâneos das forças eletromotrizes (fem) nos enrolamentos primário e secundário.

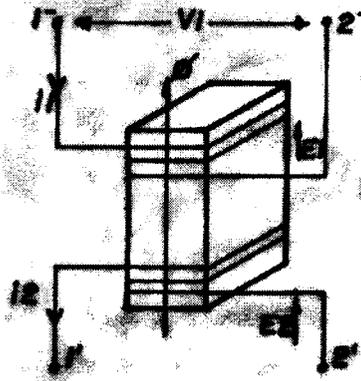
A polaridade depende de como são enroladas as espiras do primário e do secundário (figura abaixo) que podem ter sentidos concordantes ou discordantes.

Este sentido tem aplicação direta quanto à polaridade da força eletromotriz (fem).

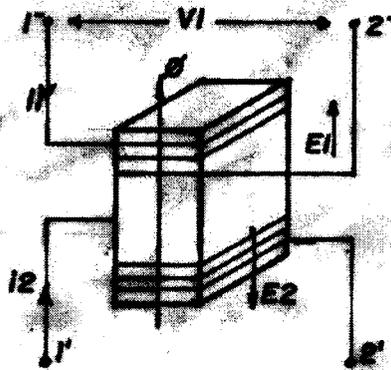
Aplicando uma tensão V_1 ao primário de ambos os transformadores como indicada à figura abaixo haverá circulação de correntes nestes enrolamentos, segundo o sentido mostrado. Admitindo que as tensões e conseqüentemente, as correntes estão crescendo então os correspondentes fluxos serão crescentes e seus sentidos indicados (figura abaixo). No caso a, teria uma força eletromotriz (fem) induzida que tenderia a produzir a corrente I_2 indicada.

Portanto, seria induzida uma força eletromotriz E_2 no sentido indicado, que irá ser responsável por um fluxo \emptyset contrário ao \emptyset . Já no caso b, tal força eletromotriz (fem) deverá ter sentido oposto ao anterior, com o propósito de continuar produzindo um fluxo contrário ao indutor.

Ligando-se os terminais 1 e 1' em curto e colocando-se um voltímetro entre 2 e 2', verifica-se que as tensões induzidas (E_1 e E_2) irão subtrair-se (caso a) ou somar-se (caso b), originando daí a designação para os transformadores.



Caso a



Caso b

\emptyset → fluxo produzido pela corrente I_1 ;

a) sentido concordante dos enrolamentos;

b) sentido discordante dos enrolamentos;

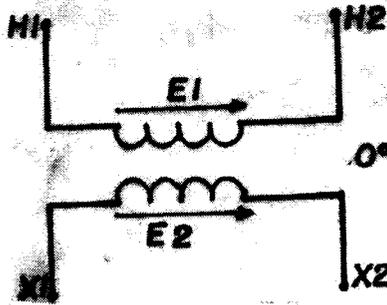
Caso a: polaridade subtrativa (mesmo sentido dos enrolamentos);

Caso b: polaridade aditiva (sentidos contrários dos enrolamentos).

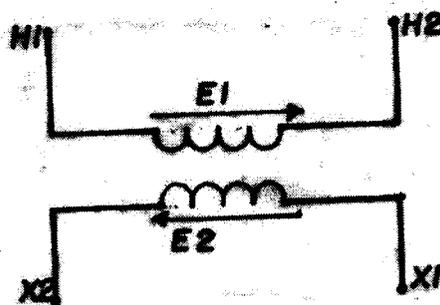
21.1 MARCAÇÃO DO TERMINAIS:

A ABNT recomenda que os terminais de tensão superior sejam marcados com H_1 e H_2 e os de tensão inferior com X_1 e X_2 .

Usando tal notação, têm-se os arranjos da figura abaixo.



Polaridade subtrativa

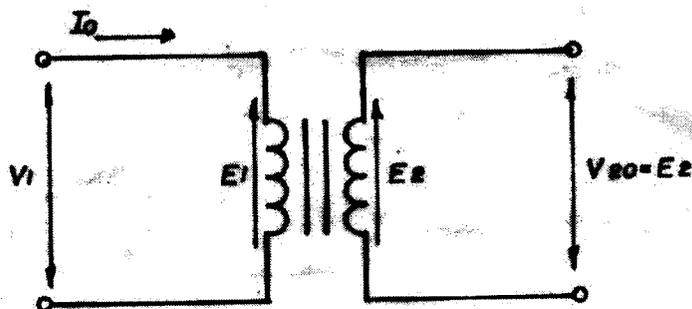


Polaridade Aditiva

Com isso, pode-se observar que, na polaridade subtrativa, os terminais com índice 1 são adjacentes, o mesmo acontecendo com os índices 2 e na polaridade aditiva, estes índices são opostos entre si.

22. AUTOTRANSFORMADORES

O transformador monofásico apresentado pode ser transformado em um autotransformador, unindo o circuito primário ao secundário, as tensões que apresentara dependera da polaridade magnética.



Vejamos alguns exemplos:

a) Transformador original isolado

b) Ligação como autotransformador elevador, usando polaridade aditiva

d) Tensões produzidas por polaridade aditiva

d) Figura rede redesenhada com ponto comum inferior mostrando as relações de corrente.

22.1 EXERCÍCIOS:

1) Para o transformador isolado de 10KVA 1200/120v ligado como autotransformador com polaridade aditiva, calcule:

- a) Capacidade original do enrolamento de 120v
- b) A capacidade original do enrolamento de 1200v
- c) A capacidade do autotransformador usando a capacidade do enrolamento de 120v
- d) Acréscimo percentual da capacidade do autotransformador em relação ao transformador isolado
- e) I_1 e I_c a partir do valor de I_2 usando na parte acima
- f) Sobrecarga percentual do enrolamento de 1200v quando usado como autotransformador

a) Ligação como transformador abaixador usando polaridade subtrativa

b) Tensões produzidas pela polaridade subtrativa

- c) Figura redesenhada com um ponto comum inferior, mostrando as relações de corrente

2) Um transformador isolado de 10Kva 1200/120v, ligado como autotransformador abaixador, com polaridade substrativa

- a) Capacidade original do enrolamento de 120v
- b) A capacidade original do enrolamento de 1200v
- c) A nova capacidade em KVA do autotransformador
- d) O acréscimo percentual em kva ao utilizar-se o transformador isolado como autotransformador
- e) I_1 e I_c a partir do valor I_2
- f) Sobrecarga percentual do enrolamento de 1200v quando usado como autotrafo

23. POLARIDADE EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Análise de defasamento angular.

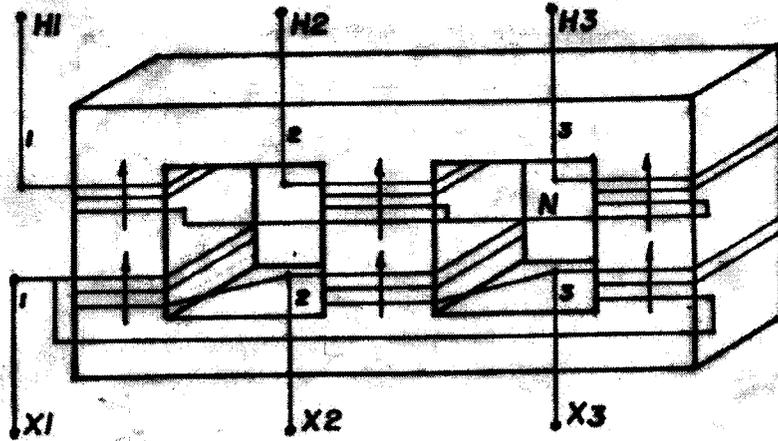
Em transformadores trifásicos, os enrolamentos de cada fase são construídos trazendo intrinsecamente o conceito de polaridade.

Isto é, isolando-se eletricamente cada uma das fases, podemos realizar o teste de polaridade do mesmo modo que para os transformadores monofásicos.

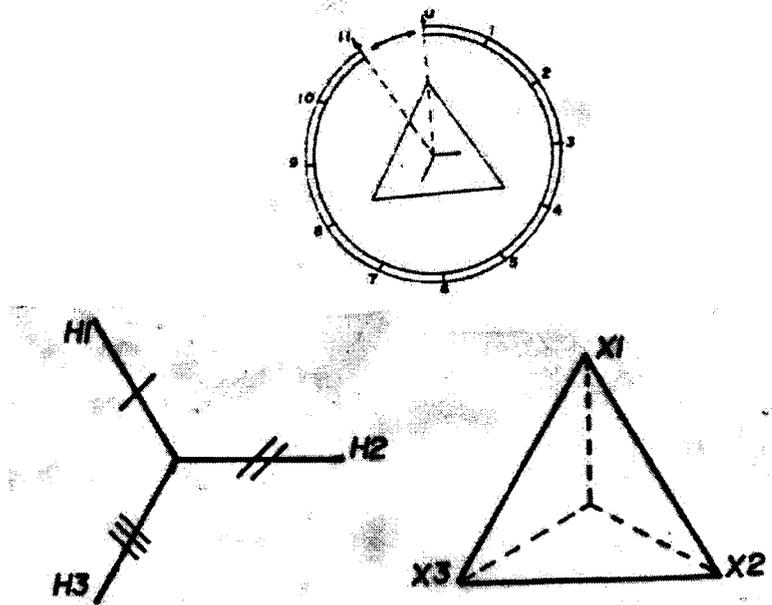
No entanto tal procedimento torna-se pouco prático, além do mais, não nos informa a maneira como estão interligados os enrolamentos.

Assim uma nova grandeza foi introduzida o deslocamento angular, é o ângulo que define a posição recíproca entre o triângulo das tensões concatenadas primárias e o triângulo das tensões concatenadas secundárias e será medido entre fases.

De uma maneira prática, seja o transformador ligado na configuração mostrada na figura abaixo.



Com o auxílio da definição de polaridade, traçamos os diagramas vetoriais de tensão do transformador, figura 4. Tomando o fasor de AT (alta tensão) como origem, determinamos o deslocamento angular através dos ponteiros de um relógio cujo ponteiro grande (minutos) se acha parado em 12 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 da tensão entre o ponto neutro (real ou imaginário) e o terminal de linha correspondentes do enrolamento considerado.



A figura 5 mostra o defasamento do exemplo usando indicação horária de fasores, o deslocamento é de -30° .

	PRIMÁRIO EM TRIÂNGULO	PRIMÁRIO EM ESTRELA	SECUNDÁRIO EM ZIGUE-ZAGUE
0°			
30°			
60°			
120°			
150°			
180°			
-150°			
-120°			
-60°			
-30°			

24. CARACTERÍSTICAS DA INSTALAÇÃO:

É dito que um transformador opera em condições normais quando:

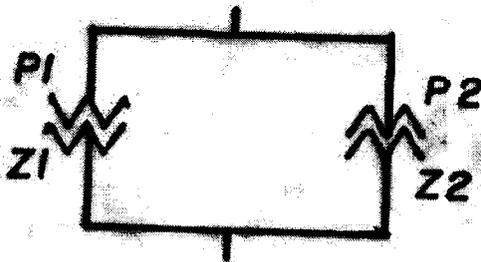
1. A altitude da instalação não supera a 1.000 metros;
2. A temperatura do ar ambiente que irá resfriar o transformador seja de no máximo 40°C e média de 30°C ;
3. Transporte e instalação de acordo com a norma NBR 7036 e NBR 7054.

25. OPERAÇÃO EM PARALELO

A operação em paralelo de transformadores faz necessário em duas situações principais:

1. Quando é necessário aumentar a carga de determinada instalação sem modificações profunda no lay-out da mesma;
2. Quando ao previr pane em um dos transformadores quisermos continuar operando o sistema, mesmo a carga reduzida.

Dois transformadores operam em paralelo, quando estão ligados ao mesmo sistema de rede, tanto no primário quanto no secundário (paralelismo de rede e barramento, respectivamente).



Mas não é possível ligarmos dois transformadores em paralelo, para operação satisfatoriamente, se não forem satisfeitas as condições dos itens 19, 20 e 21.

26. DIAGRAMAS VETORIAIS COM O MESMO DESLOCAMENTO ANGULAR

Se as demais condições forem estabelecidas, basta ligarmos entre si os terminais da mesma designação.

27. RELAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO IDÊNTICA, INCLUSIVE DERIVAÇÕES

Surgirá uma corrente circulante entre os dois transformadores caso tenham tensões secundárias diferentes. Esta corrente se soma a corrente de carga (geometricamente) e no caso de carga indutiva, haverá aumento da corrente total no transformador com maior tensão secundária enquanto que a corrente total do transformador com menor tensão secundária diminui. Isto significa que a potência que pode ser fornecida pelos dois transformadores é menor do que a soma das potências individuais, o que representa um desperdício.

A corrente circulante existe também se os transformadores estiverem em vazio, sendo independente da carga e sua distribuição.

28. IMPEDÂNCIA

A impedância é referida a potência do transformador.

Os transformadores de mesma potência deverão ter impedâncias iguais, no entanto a norma NBR 5356 admite uma variação de até $\pm 7,5\%$.

O transformador de diferentes potências aplica-se a fórmula abaixo para saber qual a impedância do novo transformador a ser instalado.

$$Z_2 = \frac{P_1 \cdot Z_1}{P_2} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

P → potência total da instalação ($P_1 + P_2$);

P_1 → potência do transformador velho;

P_2 → potência do transformador novo;

$Z_1 \rightarrow$ impedância do transformador velho;

$Z_2 \rightarrow$ impedância do transformador novo;

$Z_i \rightarrow$ impedância do transformador velho referido a base do novo.

Devemos referir as impedâncias a uma mesma base de potência, que pode ser a de qualquer um deles, da seguinte maneira:

$$Z'_2 = Z_2 \frac{P_1}{P_2} \quad \text{Equação 2}$$

$$Z'_1 = Z_1 \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Z'_1 e Z'_2 são as impedâncias dos transformadores na base nova de potência.

A divisão de potência entre transformadores em paralelo é calculada como segue abaixo:

$$P_1 = \frac{P \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{Equação 4}$$

$$P_2 = \frac{P \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \text{Equação 5}$$

$$P = Z_1 + Z_2 \quad \text{Equação 6}$$

Para os transformadores que irão operar em paralelo, as impedâncias ou tensões de curto-circuito não poderão divergir mais do que (mais ou menos) 7,5% da média das impedâncias, caso contrário o transformador de impedância menor receberá uma carga relativa maior do que o de impedância maior.

Quando o transformador de menor potência tiver a maior impedância, então são economicamente aceitáveis diferenças de 10 a 20% na impedância.

Caso contrárias condições de serviço antieconomicas já ocorrerão em transformadores ligados em paralelo, cuja relação de potencia for 1:3.

Exemplo:

Qual a impedância de um novo transformador cuja potência é 1500 KVA, o qual será ligado em paralelo com outro já existente com as seguintes características:

Potência: 1.000 KVA;

Tensões Primárias: 13,8 – 13,2 – 12,6 KV;

Tensões Secundárias: 380/220 Volts;

Impedância: 5%;

Deslocamento angular: 1

A impedância de 5% está referida na base de 1000 KVA. Devemos referi-la para a base do transformador novo. Usando a equação 3.

$$Z'_1 = Z_1 \frac{P_2}{P_1} = 5 \frac{1500KVA}{1000KVA}$$

$$Z'_1 = 7,5\%$$

Calcularemos a impedância que deverá ter o novo transformador de 1500 KVA. Da equação 1.

$$Z_2 = \frac{P_1 \cdot Z'_1}{P_2} = \frac{1000 \cdot 7,5}{1500} = 5\%$$

Esta impedância já está na base do novo transformador (1500 KVA).

O novo transformador deverá ter as seguintes características:

Tensão Primária: 13,8 – 13,2 – 12,6 KV;

Tensão Secundária: 380/220 Volts;

Impedância: 5%;

Deslocamento angular: 1

23. Operação em paralelo

23.1 Divisão de cargas entre transformadores.

Pode-se calcular a potência fornecida individualmente, pelos transformadores de um grupo em paralelo, através da seguinte fórmula:

$$P_{f1...n} = \frac{P_{n1...n}}{\bar{Z}P_{n1...n}} \frac{E_m}{E_{1...n}} P_c$$

$$E_m = \frac{\bar{Z}P_{n1...n}}{\bar{Z} \frac{P_{n1...n}}{E_{1...n}}}$$

Onde:

$P_{f1...n}$ n → Potência fornecida a carga pelo transformador $P_{n1...n}$ (KVA);

$P_{n1...n}$ → Potência nominal do transformador, 1....n (KVA);

E_m → Tensão média de curto-circuito (%);

$E_{1...n}$ → Tensão de curto-circuito do transformador 1....n (%);

P_c → Potência solicitada pela carga (KVA).

Exemplo:

Calcular as potências pela carga (KVA) das individualmente pelos transformadores, $P_{n1} = 300$ KVA, $P_{n2} = 500$ KVA, $P_{n3} = 750$ KVA, cujas tensões de curto-circuito são as seguintes: $E_1 = 4,5\%$, $E_2 = 4,9\%$, $E_3 = 5,1\%$ e a potência solicitada pela carga são de 1550 KVA.

Resolução:

$$E_m = \frac{300 + 500 + 750}{\frac{300}{4,5} + \frac{500}{4,9} + \frac{750}{5,1}} = 4,908\%$$

$$P_1 = \frac{300}{300 + 500 + 750} \cdot \frac{4,908}{4,5} \cdot 1550 = 327,3 \text{ KVA}$$

$$P_2 = \frac{500}{300 + 500 + 750} \cdot \frac{4,908}{4,9} \cdot 1550 = 500,9 \text{ KVA}$$

$$P_3 = \frac{750}{300 + 500 + 750} \cdot \frac{4,908}{5,1} \cdot 1550 = 721,8 \text{ KVA}$$

Observa-se que o transformador de 300 KVA por ter a menor impedância está sobrecarregado, enquanto que o transformador de 750 KVA que possui a maior impedância está operando abaixo de sua potência nominal.

29. EXERCÍCIOS:

29.1 Ao realizar o ensaio de curto-circuito em um transformador:

a) Por que é o lado de baixa tensão que é usualmente curto-circuitado.

b) Explique por que o fato de se por em curto-circuito o secundário de um transformador permite o cálculo a partir das medidas da tensão, corrente e potências das resistências e impedâncias equivalentes.

c) Por que são consideradas desprezíveis as perdas no núcleo de um transformador.

29.2 Como se determinam as perdas no cobre na operação em curto-circuito.

29.3 Qual a tensão necessária para a realização do ensaio em curto-circuito.

29.4 Desenhe o circuito equivalente de um transformador.

29.5 Defina: V'_1 , I'_1 , r'_1 , jx'_1 e Z'_m

29.6 Demonstre que $\Delta V = Z_2 \cdot I_2$.

29.7 Prove que $X\% = Z\%^2 - R\%^2$

29.8 Qual a necessidade de se fazer à regulação de tensão para transformadores.

29.9 Demonstre o diagrama fasorial.

29.10 Demonstre que $\text{Reg}\% = \frac{I_2}{I_{2n}} \cdot R\% \cdot \cos \varphi_c + \frac{I_2}{I_{2n}} \cdot X\% \cdot \text{sen} \varphi_c$

29.11 Qual a influência da polaridade em transformadores monofásicos e trifásicos.

29.12 Demonstre o deslocamento angular em que o primário do transformador trifásico está em triângulo e em estrela.

29.13 Quais as condições para um transformador operar em paralelo.

29.14 Cite as características de instalação de um transformador.

30. ENERGIZAÇÃO

A energização é o passo final para colocação de um transformador em funcionamento. Algumas vezes a energização é feito logo após a montagem e instalação, neste caso uma série de medidas já foi tomada no transcorrer das etapas, dispensando-se nova revisão.

Entretanto, é comum acontecer que entre a instalação e a energização decorra um espaço de tempo relativamente longo, exigindo assim que se repitam os diversos procedimentos que antecedem a energização.

Abaixo citamos alguns pontos a serem verificados:

1) Antes da energização, veja:

- Se todas as partes estão devidamente montadas e em seus respectivos lugares;
- O nível do líquido isolante;
- A posição do comutador e se está devidamente travado;
- Caso o transformador tenha recebido complementação ou enchimento com líquido isolante, aguardar um tempo mínimo de 24 horas para que haja liberação das eventuais bolhas de ar internas ainda existentes;
- Efetivo aterramento do sistema;
- Testar todos os acessórios do transformador;
- A relação de transformação;
- Resistência de isolamento;
- Painel de comutação e diagrama de ligação.

2) Após a energização:

- Tensões secundárias;
- Nível de ruído;
- Elevação de temperatura do líquido isolante.

31 ACESSÓRIOS

31.1 Desumidificador de Ar (Sílica-Gel):

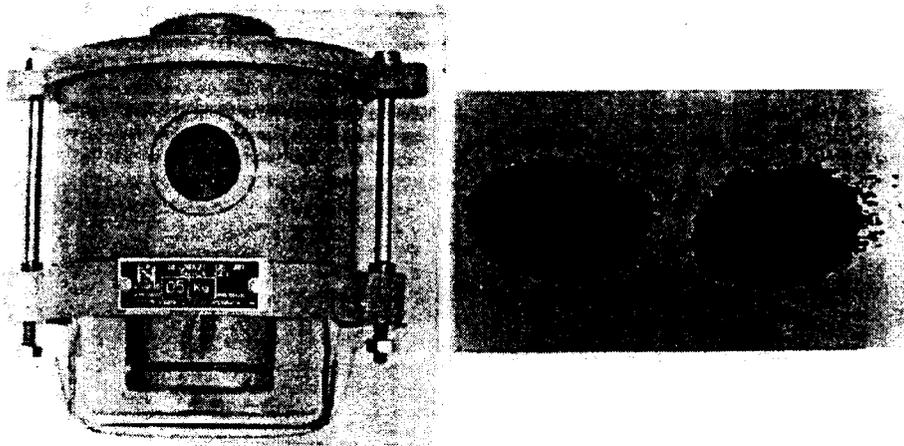
31.1.1 Generalidades:

A fim de que seja mantido elevados os índices dielétricos do óleo dos transformadores, estes são equipados com secadores de ar, os quais devido à capacidade de absorção de umidade, secam o ar aspirado e que flui ao transformador.

31.1.2 Construção:

O secador de ar é composto de um recipiente metálico, com dois visores, no qual está contido o agente secador e uma antecâmara para o óleo, colocada diante do recipiente (que contem o agente) isolando-o da atmosfera (figura abaixo).

Durante o funcionamento normal do transformador, o óleo aquece e dilata, expulsando o ar do conservador através do secador. Havendo diminuição da carga do transformador ou da temperatura ambiente também haverá abaixamento da temperatura do óleo, acompanhada da respectiva redução do volume.



Forma-se então, uma depressão no conservador e o ar ambiente são aspirados através da antecâmara e do agente secador, o qual absorve a umidade contida no ar, que entrará em contato com o óleo. Desde que a granulação seja correta, um crivo montado na parte inferior do recipiente evita que o agente caia na antecâmara do óleo, sujando-a.

31.1.3 Agente Secador:

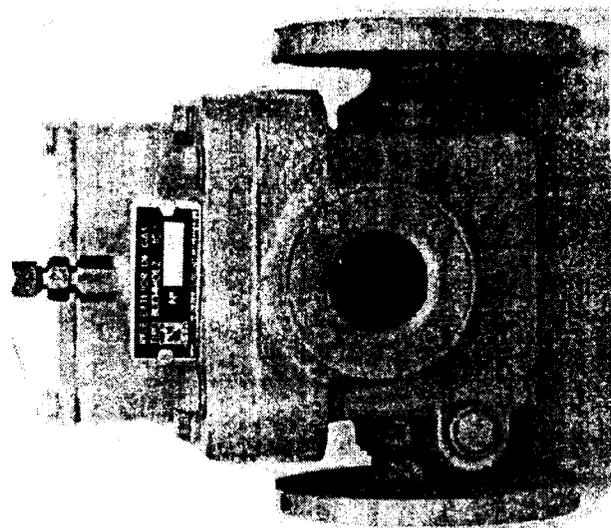
O agente secador, denominado sílica-gel é vítreo e duro, quimicamente quase neutro e altamente higroscópico. É um anídrico sílico, impregnado com cloreto de cobalto, tendo quando em estado ativo uma cor azulada.

31.2 Rele de Gás (tipo Buchholz)

31.2.1 Generalidades

O relé Buchholz (figura abaixo) tem por finalidade proteger aparelhos elétricos que trabalham imersos em líquido isolante, geralmente transformadores. Enquanto sobrecargas e sobrecorrentes são fenômenos controláveis por meio de relés de máxima intensidade de corrente, defeitos tais como: perda de óleo, descargas internas, isolação defeituosa do enrolamento, do ferro ou mesmo contra a terra, ocorridos em transformadores equipados com um relé de máxima intensidade de corrente podem causar avarias de grande monta, caso o defeito permaneça despercebido do operador durante algum tempo.

Relés Buchholz são instalados em transformadores, justamente para, em tempo útil, assinalar por meio de alarme ou através de desligamento do transformador, defeitos como os acima citados e deste modo evitarem continuidade dos mesmos.



31.2.2. Descrição e Principio de Funcionamento

O relé Buchholz é normalmente montado entre o tanque principal e o tanque de expansão de transformadores. A carcaça do relé é de ferro fundido, possuindo duas aberturas flangeadas e ainda dois

visores providos de uma escala graduada indicativa do volume de gás. Internamente encontram-se duas bóias montadas uma sobre a outra. Quando do acumulo de uma certa quantidade de gás no relé, a bóia superior é forçada a descer. Se por sua vez, uma produção excessiva de gás provoca uma circulação de óleo no relé, é a bóia inferior que reage, antes mesmo que os gases formados atinjam o relé. Em ambos os casos, as bóias ao sofrerem o deslocamento, ligam um contato elétrico.

31.3 Instruções de Serviço.

O alarme soa sem que o transformador seja desligado. Deve-se desligar imediatamente o transformador, e em seguida fazer o teste do gás. De acordo com o resultado do teste, os seguintes defeitos podem ser distinguidos:

1. Gás combustível, presença de acetileno;
2. Gás incombustível, sem acetileno. Neste caso temos ar puro. O transformador poderá ser ligado novamente sem perigo. O alarme soando repetidamente indica ar penetrando no transformador. Desligue e repare a falha.
3. Nenhuma formação de gás, nível de gás no relé esta baixando e uma quantidade de ar está sendo sugada através da torneira aberta. Neste caso o nível de óleo está muito baixo possivelmente devido a um vazamento. Preencha com óleo até o nível e controle a estanqueidade.
4. O transformador é desligado sem alarme prévio. Neste caso o transformador deve ter sido sobrecarregado termicamente. Ligue novamente após um intervalo para refrigeração. O defeito poderá ser encontrado no contato de curto-circuito ou no sistema de relés. O alarme soa e o transformador é desligado imediatamente antes ou após ter soado. Neste caso uma das falhas já descritas em 1, 2 ou 3 devem ser a causa.

Faz-se o teste do gás e procede-se do mesmo modo acima mencionado.

31.4 Termômetro com Contatos

31.4.1 Com haste rígida

31.4.2 Aplicação

Este termômetro (figura abaixo) possui dois ponteiros de ligação e um de indicação de temperatura máxima atingida em períodos.



Estes três ponteiros são controláveis externamente, sendo que os dois primeiros movimentam-se apenas por ação externa, enquanto que o último é impulsionado pela agulha de temperatura, apenas quando em ascensão desta, pois, na redução ele fica imóvel, sujeito apenas à ação externa, possibilitando a verificação da temperatura máxima atingida em um dado período.

O termômetro possui na extremidade um bulbo que é colocado no ponto mais quente do óleo, logo abaixo da tampa.

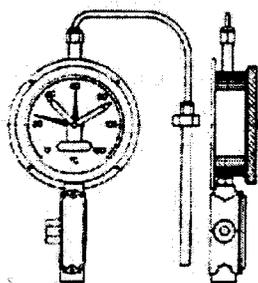
O bulbo contém em seu interior uma coluna de mercúrio (Hg) que transmite as variações da temperatura até o bimetálico existente, indo a agulha indicadora de temperatura.

31.4.3 Instrução

Pelo controle externo os ponteiros limites poderão ser movimentados a vontade.

Ponteiro indicador de temperatura máxima do período.

Após a inspeção periódica de o termômetro voltar o ponteiro indicador até encostar-se ao ponteiro principal através do controle externo.

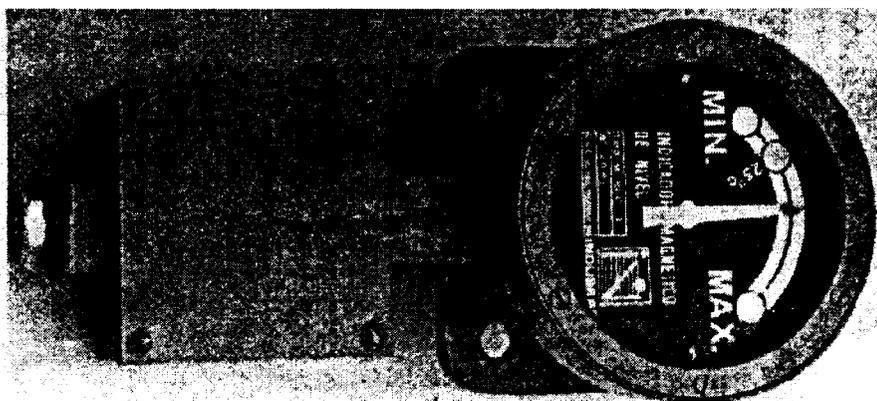


31.5 Indicador de Nível de Óleo

Os indicadores magnéticos de nível tem por finalidade indicar com perfeição o nível de líquidos, tais como água, óleo, etc. cuja densidade não ultrapasse 10 graus Engler e ainda, quando providos de contatos para alarme, servirem com aparelhos de proteção a máquina, tais como transformadores etc.

31.5.1 Descrição e Princípio de funcionamento

Os indicadores magnéticos de nível (figura abaixo) fabricados conforme normas ANSI possuem a sua carcaça em alumínio fundido, sendo que a indicação de nível é feita por ponteiro acoplado a um ímã permanente, de grande sensibilidade, fato este que o torna bastante preciso.



O mostrador dos indicadores magnéticos de nível possui três indicações, ou seja, min que corresponde ao nível mínimo, 25 °C que corresponde à temperatura ambiente assinalada e Max que corresponde ao nível máximo.

31.6 Tubo de Explosão

Destina-se a proteger o transformador contra sobre-pressão súbita.

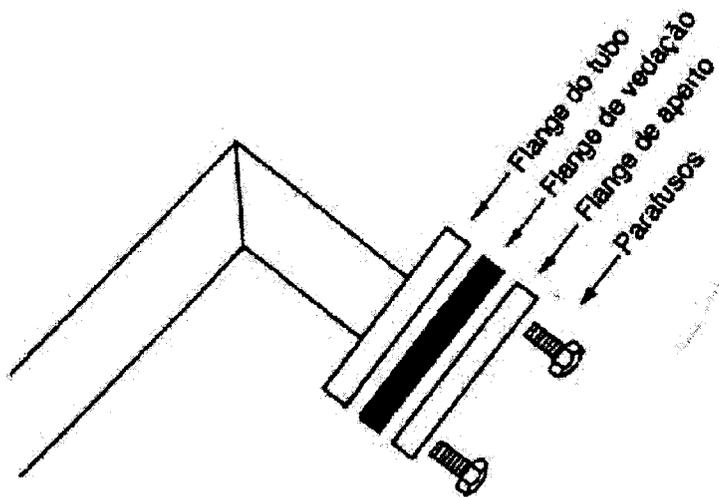
Consiste basicamente, de um tubo que de um lado é conectado ao tanque do transformador, no outro lado, possui um disco de ruptura.

Em caso de súbita elevação de pressão que ultrapasse o valor de ruptura do disco, haverá o rompimento com abertura total da sessão de passagem, fazendo a pressão cair rapidamente sem danificar outras partes do transformador.

31.6.1 Procedimentos para montagem do disco de ruptura para transformadores com tubo de explosão (figura abaixo)

Devido à fragilidade do disco de ruptura quando o transformador é transportado, o disco é acondicionado em embalagem à parte. Deverá ser montado na ocasião da instalação do transformador, obedecendo aos procedimentos abaixo:

1. Retirar os parafusos existentes no flange do tubo de explosão, não é necessário baixar o nível do óleo existente;
2. Retirar a flange de vedação;
3. Colocar o disco de ruptura no local do flange de vedação;
4. Recolocar os parafusos;
5. Certificar-se de que ficou com aperto suficiente.



31.7 Válvula de Alívio de Pressão

A válvula de alívio de pressão de fechamento automático é instalada em transformadores imersos em líquido isolante com a finalidade de protegê-los contra possível deformação ou ruptura do tanque, em casos de defeito interno com aparecimento de pressão elevadas. A válvula é extremamente sensível e rápida (opera em

menos de dois milésimos de segundo), fecha-se automaticamente após a operação impedindo assim a entrada de qualquer agente externo no interior do transformador.

31.8 Relé de Pressão Súbita

O relé de pressão súbita é um equipamento de proteção para transformadores do tipo selado, é instalado acima do nível máximo do líquido, no espaço com gás compreendido entre o líquido e a tampa do transformador.

O relé é projetado para atuar quando ocorrem defeitos no transformador que produzem pressão interna anormal sendo sua operação ocasionada somente pelas mudanças rápidas da pressão interna independente da pressão de operação do transformador.

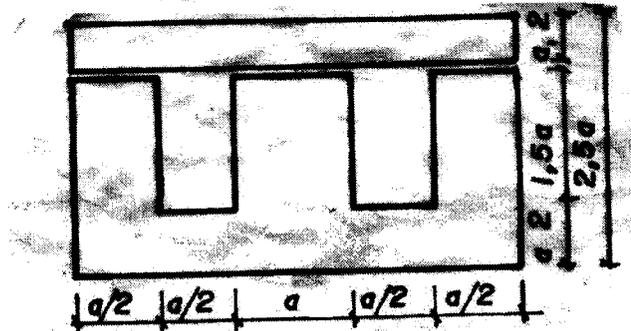
Para aumentos de pressão de 0,4 atm/seg o relé opera em cerca de 3 ciclos. Para aumentos de pressão mais rápidos (1 atm/seg) a operação dá-se em menos de um ciclo. Por outro lado, o relé não opera devido a mudanças lentas de pressão próprios do funcionamento normal do transformador, bem como durante perturbações do sistema (raios, sobretensão de manobra ou curto-circuito) a menos que tais perturbações produzam danos no transformador.

32. CÁLCULO DE UM PEQUENO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

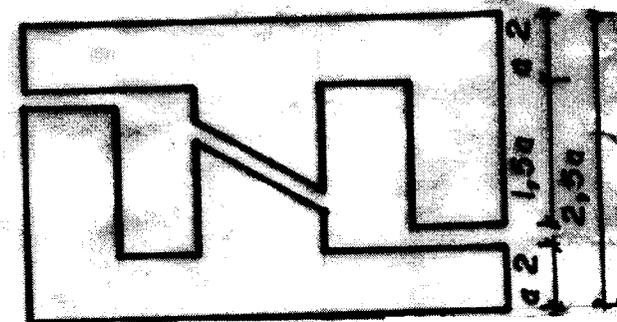
32.1 Núcleo

Os cálculos que serão feitos em seguida são provenientes das dimensões do núcleo de um transformador, motivo pelo qual devemos conhecer os possíveis tipos de chapas existentes.

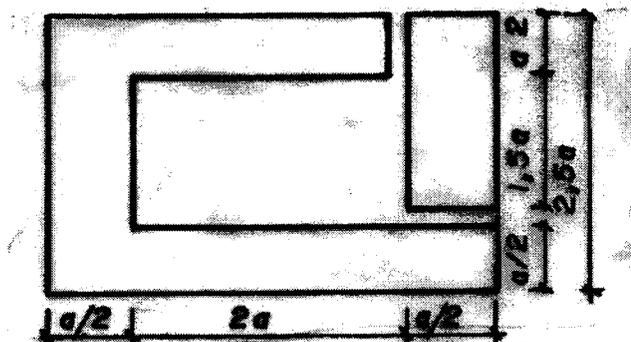
1. Tipo EI



2. Tipo F



3. Tipo CI



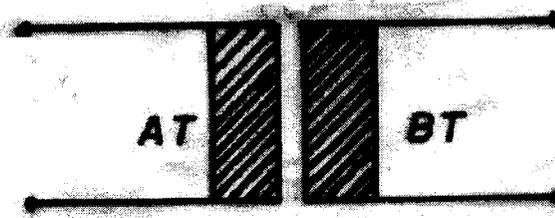
As chapas do núcleo devem ser isoladas com verniz apropriado e em caso de manutenção protegidas com anticorrosivo.

Feito este tratamento, as chapas devem ser montadas de forma a evitar o entreferro, isto pode ser conseguido se montado as chapas alternadamente.

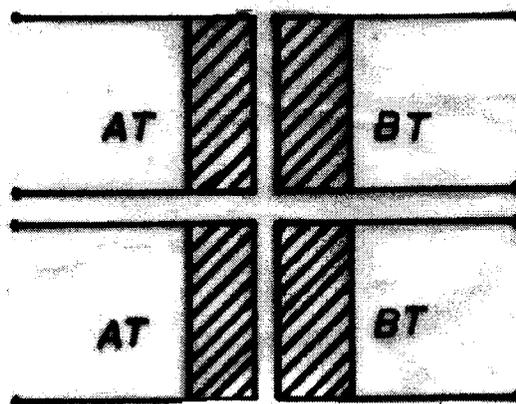
32.2 Enrolamentos

Os transformadores podem apresentar uma ou mais tensões em cada enrolamento. A opção depende exclusivamente da aplicação do transformador. Veremos em seguida algumas possibilidades construtivas.

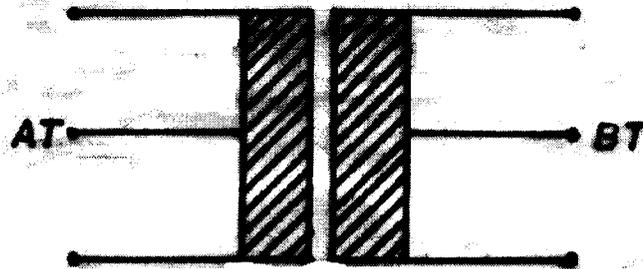
1. Transformadores Monofásicos com um enrolamento de AT e BT.



2. Transformadores Monofásicos com dois enrolamentos independentes de AT e BT.

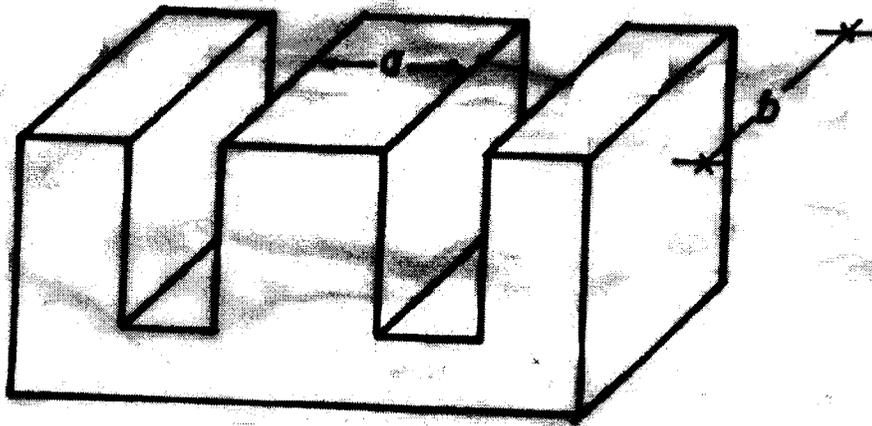


3. Transformadores Monofásicos com dois enrolamentos de AT e BT, com tap central.



32.3 Cálculos.

Considerar-se-á como transformador de pequena potência, os transformadores de até 1 KVA.



32.3.1 Seção Geométrica do Núcleo (S_{gn}).

$$S_{gn} = a \cdot b \quad [\text{cm}^2]$$

a → largura da coluna central em cm;

b → espessura do núcleo em cm.

$a =$ _____ cm

$b =$ _____ cm

$S_{gn} =$ _____ cm^2

27.3.2 Seção Magnética do Núcleo (S_{mn}),

$$S_{mn} = S_{gn} \cdot F_u \quad [\text{cm}^2]$$

S_{gn} → Seção Geométrica do Núcleo;

F_u → Fator de utilização. Número que varia entre 0,8 e 0,9, dependendo do estado de conservação das chapas.

$$S_{gn} = \underline{\hspace{10em}} \text{cm}^2$$

$$F_u = \underline{\hspace{10em}}$$

$$S_{mn} = \underline{\hspace{10em}} \text{cm}^2$$

32.3.3 Potência do Núcleo ou Potência do Primário (P_1).

$$P_1 = (S_{mn})^2 \quad [\text{VA}]$$

S_{mn} → Seção magnética do núcleo (cm^2)

$$S_{mn} = \underline{\hspace{10em}} \text{cm}^2$$

$$P_1 = \underline{\hspace{10em}} \text{VA}$$

32.3.4 Potência do Secundário (P_2).

A potência do secundário é inferior a potência do primário, devido às perdas internas no transformador.

$$P_2 = \frac{P_1}{1,10} \quad [\text{VA}]$$

P_1 → Potência do Primário (VA);

$$P_1 = \underline{\hspace{10em}} \text{VA}$$

$$P_2 = \underline{\hspace{10em}} \text{VA}$$

1,10 → constante provenientes das perdas internas no transformador.

32.3.5 Corrente do Primário (I_1).

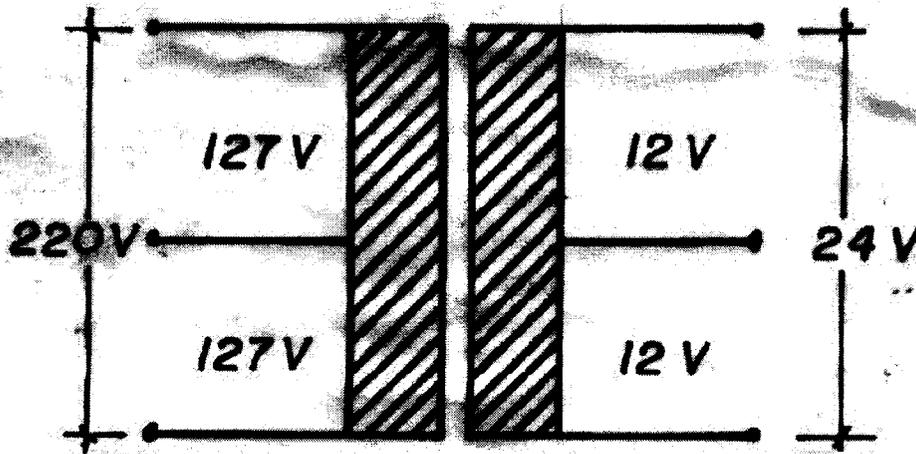
$$I_1 = \frac{P_1}{V_1} \text{ [A]}$$

P_1 → Potência do primário (VA);

V_1 → Tensão do primário (V).

Observação: Quando o enrolamento primário possuir mais de uma tensão, devemos calcular a corrente correspondente a cada tensão.

Exemplo: se o transformador for o abaixo.



Teremos:

$P_1 =$ _____ VA

$V_1 =$ _____ V

$I_1 =$ _____ A

32.3.6 Corrente do Secundário (I_2)

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \text{ [A]}$$

P_2 → Potência do secundário (VA);

V_2 → Tensão do secundário (V).

Observação: Quando o enrolamento secundário possuir mais de uma tensão, devemos calcular a corrente correspondente a cada tensão.

Exemplo: se o transformador for o anteriormente usado, teremos.

$$P_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ VA}$$

$$V_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

$$I_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$$

32.3.7 Seção do Fio do Enrolamento Primário (S_{1c}).

$$S_{1c} = \frac{I_1}{d} \text{ [mm}^2\text{]}$$

I_1 → Corrente do enrolamento primário (A);

d → Densidade de corrente (A/mm²), escolher-se-á um valor entre os limites de 3 a 6 A/mm².

S_{1c} → Seção calculada do enrolamento primário (mm²);

S_{1r} → Seção real do enrolamento primário, obtida mediante consulta a tabela de fios anexa (procurar o valor mais próximo).

Observação: Quando o enrolamento primário possuir mais de uma tensão, logo, mais de uma corrente, devemos calcular as diversas seções existentes no enrolamento. Exemplo: se considerarmos o transformador usado anteriormente, teremos.

$$I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$$

$$d = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A/mm}^2$$

$$S_{1c} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}^2$$

$$S_{1r} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}^2$$

32.3.8 Seção do Fio do Enrolamento Secundário (S_{2c}).

$$S_{2c} = \frac{I_2}{d} \text{ [mm}^2\text{]}$$

I_2 → Corrente do enrolamento secundário (A);

d → Densidade de corrente (A/mm²), escolher-se-á um valor entre os limites de 3 a 6 A/mm².

S_{2c} → Seção calculada do enrolamento secundário (mm²);

S_{2r} → Seção real do enrolamento secundário, obtida mediante consulta a tabela de fios anexa (procurar o valor mais próximo).

$$I_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$$

$$d = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A/mm}^2$$

$$S_{2c} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}^2$$

$$S_{2r} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}^2$$

32.3.9 Densidade Real de Corrente do Primário (d_{r1}).

$$d_{r1} = \frac{I_1}{S_{1r}} \quad [\text{A/mm}^2]$$

I_1 → Corrente do enrolamento primário (A);

S_{1r} → Seção real do fio do enrolamento primário (mm^2);

d_{r1} → Densidade real (A/mm^2) e deve ficar entre os limites de 3 a 6 A/mm^2 .

Observação: Quando o enrolamento primário possuir mais de um valor de tensão, logo, mais de um valor de corrente devemos calcular todas as densidades correspondentes, tendo então.

$$I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$$

$$S_{1r} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}^2$$

$$d_{r1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A/mm}^2$$

32.3.10 Densidade Real de Corrente do Secundário (d_{r2}).

$$d_{r2} = \frac{I_2}{S_{2r}} \quad [\text{A/mm}^2]$$

I_2 → Corrente do enrolamento secundário (A);

S_{2r} → Seção real do fio do enrolamento secundário (mm^2);

d_{r2} → Densidade real (A/mm^2) e deve ficar entre os limites de 3 a 6 A/mm^2 .

$$I_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$$

$$S_{2r} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mm}^2$$

$$d_{r2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A/mm}^2$$

32.3.11 Número de Espiras do Enrolamento Primário (N_1)

$$N_1 = \frac{V_1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{mn}} \text{ [espiras]}$$

V_1 → Tensão do enrolamento primário (V);

f → Frequência (60 Hz);

B → Indução magnética, valor entre 10.000 e 11.000 Gauss.

Observação: Se as chapas do núcleo forem de boa qualidade usa-se $B = 11.000$ Gauss, caso contrário $B = 10.000$ Gauss.

Se o enrolamento primário possuir outras tensões, podemos determinar o seu número de espiras aplicando a fórmula acima ou pela relação:

$$V_1 = \text{_____} \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$B = \text{_____} \text{ Gauss}$$

$$S_{mn} = \text{_____} \text{ cm}^2$$

32.3.12 Número de Espiras do Enrolamento Secundário (N_2).

$$N_2 = \frac{V_2 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{mn}} \text{ [espiras]}$$

V_2 → Tensão do enrolamento secundário (V);

f → Frequência (60 Hz);

B → Indução magnética (Gauss);

S_{mn} → Seção magnética do núcleo (cm^2).

$$V_2 = \text{_____} \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$B = \text{_____} \text{ Gauss}$$

$$S_{mn} = \text{_____} \text{ cm}^2$$

Tabela de Fios de Cobre para enrolamentos

	Diâmetro fio Esmaltado (mm)	Seção (mm ²)
		107
		84,6
		67,5
		53,4
		42,3
		33,6
		26,6
		21,2
		16,8
		13,3
		10,5
	3,32	8,35
	2,06	6,65
	2,65	5,27
	2,6	4,15
	2,11	3,3
	1,88	2,63
	1,68	2,09
	1,5	1,65
	1,34	1,3
	1,2	1,04
	1,07	0,818
	0,96	0,65
	0,86	0,515
	0,77	0,407

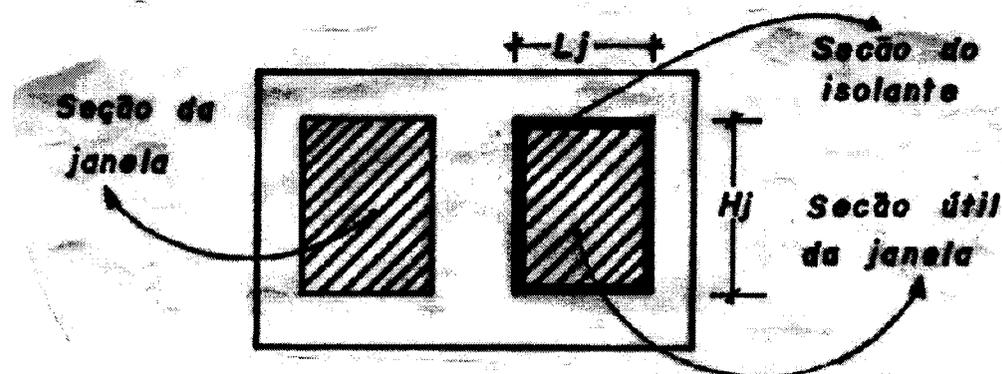
	0,69	0,322
	0,61	0,255
	0,55	0,204
	0,48	0,159
	0,44	0,126
	0,39	0,102
	0,35	0,0805
	0,31	0,066
	0,27	0,0491
	0,25	0,0415
	0,22	0,0314
	0,20	0,0254
	0,18	0,0201
	0,16	0,0154
	0,14	0,0132
	0,12	0,00951
	0,112	0,00785
	0,099	0,00636
	0,089	0,00502
	0,077	0,00385
	0,068	0,00317
	0,061	0,00257
	0,054	0,00203
	0,048	0,00158
	0,044	0,00114

32.5 Verificação da Possibilidade de Execução.

Apresentaremos dois métodos de verificação com os quais determinaremos se o transformador até então calculado pode ou não ser constituído.

32.5.1 Primeiro Método.

Verifica-se inicialmente o desenho explicativo:



32.5.1.1 Cálculo da Seção da Janela (S_j).

$$S_j = L_j \cdot H_j \text{ [mm}^2\text{]}$$

L_j → Largura da janela em mm;

H_j → Altura da janela em mm.

$L_j =$ _____ mm

$H_j =$ _____ mm

$S_j =$ _____ mm²

32.5.1.2 Seção do Isolante (S_i).

$$S_i = \text{Esp} \cdot L(\text{isolante}) \text{ [mm}^2\text{]}$$

Esp → Espessura do isolante em mm

$L(\text{isolante})$ → Comprimento do isolante = $2 \cdot H_j + 2 \cdot L_j$ [mm]

Esp = 0,5 mm

$L(\text{isolante}) =$ _____ mm

$S_i =$ _____ mm²

32.5.1.3 Seção Útil da Janela (S_{uj}).

$$S_{uj} = S_j - S_i \quad [\text{mm}^2]$$

$S_j \rightarrow$ Seção da Janela em mm^2

$S_i \rightarrow$ Seção do Isolante em mm^2

$S_j =$ _____ mm^2

$S_i =$ _____ mm^2

$S_{uj} =$ _____ mm^2

32.5.1.4 Seção do Cobre (S_{cu}).

$$S_{cu} = N_1 \cdot S_{1r} + N_2 \cdot S_{2r} \quad [\text{mm}^2]$$

$N_1 \rightarrow$ Numero de espiras do enrolamento primário;

$S_{1r} \rightarrow$ Seção real do enrolamento primário em mm^2 ;

$N_2 \rightarrow$ Número de espiras do enrolamento secundário;

$S_{2r} \rightarrow$ Seção real do enrolamento secundário em mm^2 .

$N_1 =$ _____ espiras

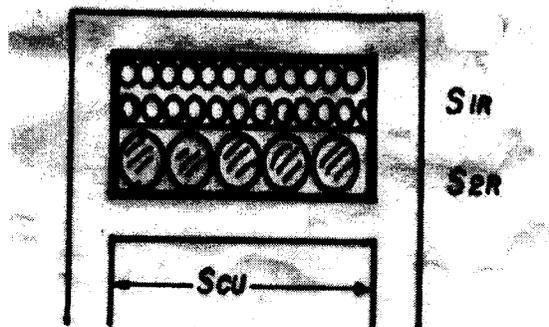
$S_{1r} =$ _____ mm^2

$N_2 =$ _____ espiras

$S_{2r} =$ _____ mm^2

$S_{cu} =$ _____ mm^2

Para melhor entendermos, vejamos o desenho:



32.5.1.5 Verificação Final

$$x = \frac{S_{uj}}{S_{CU}}$$

Se $x \begin{cases} \geq 3 \cdot \text{execução} \cdot \text{possível} \\ < 3 \cdot \text{execução} \cdot \text{impossível} \end{cases}$

S_{uj} → Seção útil da janela em mm^2

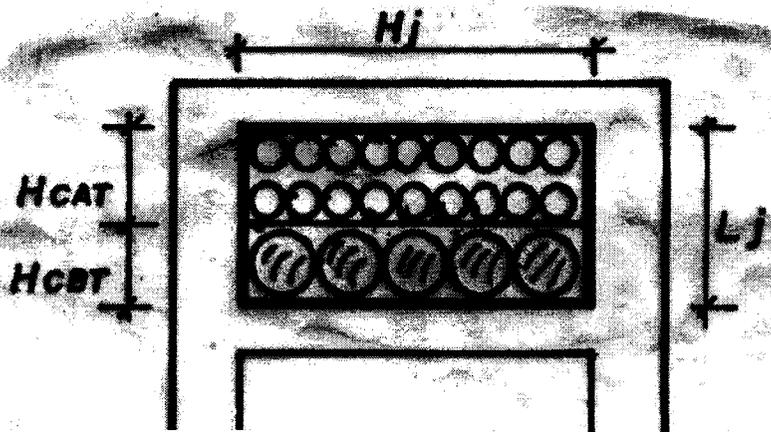
S_{CU} → Seção do Cobre em mm^2

$S_{uj} =$ _____ mm^2

$S_{CU} =$ _____ mm^2

$X =$ _____

Resultado: _____



32.6 Procedimentos para Tornar a Execução Possível.

1. Aumentar a densidade de corrente;

Desta forma diminuimos a seção dos condutores e contribuimos para a possibilidade de execução do transformador.

2. Aumentar a seção magnética do núcleo e recalcular.

Diminuimos o número de espiras, mas em contra partida aumentamos a potência e as correntes, caso usar-se-á uma seção maior. A solução acima não assegura a possibilidade de execução.

3. Limitar a corrente.

Fazemos um levantamento da corrente a ser absorvida pela carga ligada ao transformador. É uma solução paliativa.

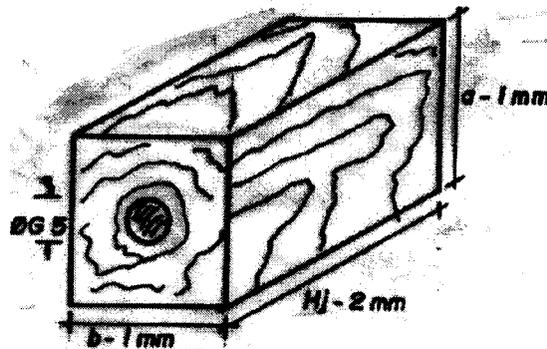
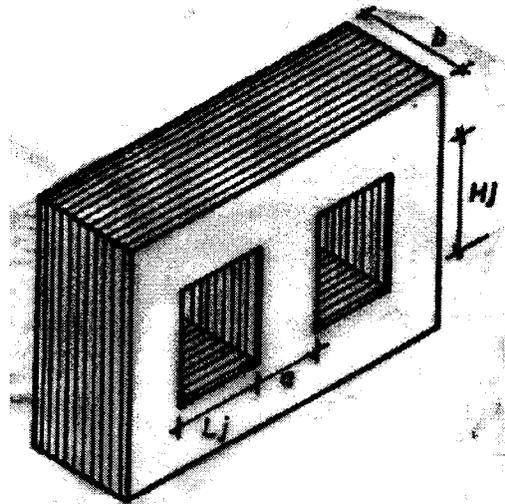
4. Alteração do tipo de chapa.

É a solução técnica para o problema, pois mediante consulta a catálogos de fabricantes de chapas, escolhemos uma que permita a construção do transformador com características elétricas desejadas.

32.6 Operações a serem executadas para a construção do carretel

32.6.1 Construção do Molde de Madeira

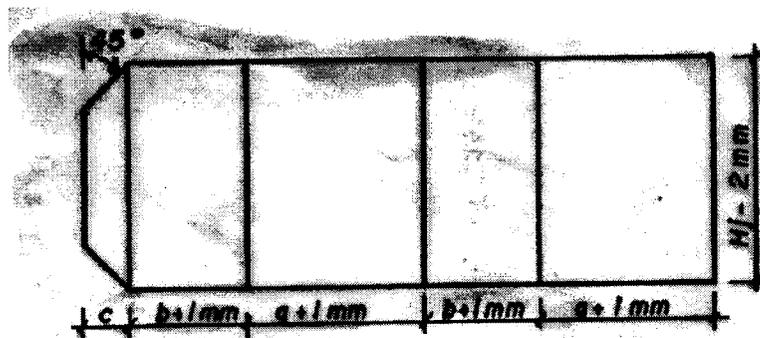
O molde de madeira tem como finalidade facilitar a construção do carretel bem como evitar a deformação do mesmo. Deverá ser de qualquer tipo de madeira e obedecer às dimensões mostradas na seqüência de desenhos.



32.6.2 Preparar Moldes para Enrolamentos.

Nos trabalhos de rebobinagem é freqüente ter necessidade de preparar moldes para realizar sobre eles os enrolamentos. Na maioria das vezes, o trabalho de confecção de moldes é dado ao carpinteiro. Cabe, porem, ao técnico, fornecer a esse profissional um esboço com as dimensões, ou até mesmo, construir esse molde.

Inicialmente, recorte um pedaço de papel hexágono, (prespan), obedecendo as dimensões abaixo indicadas.



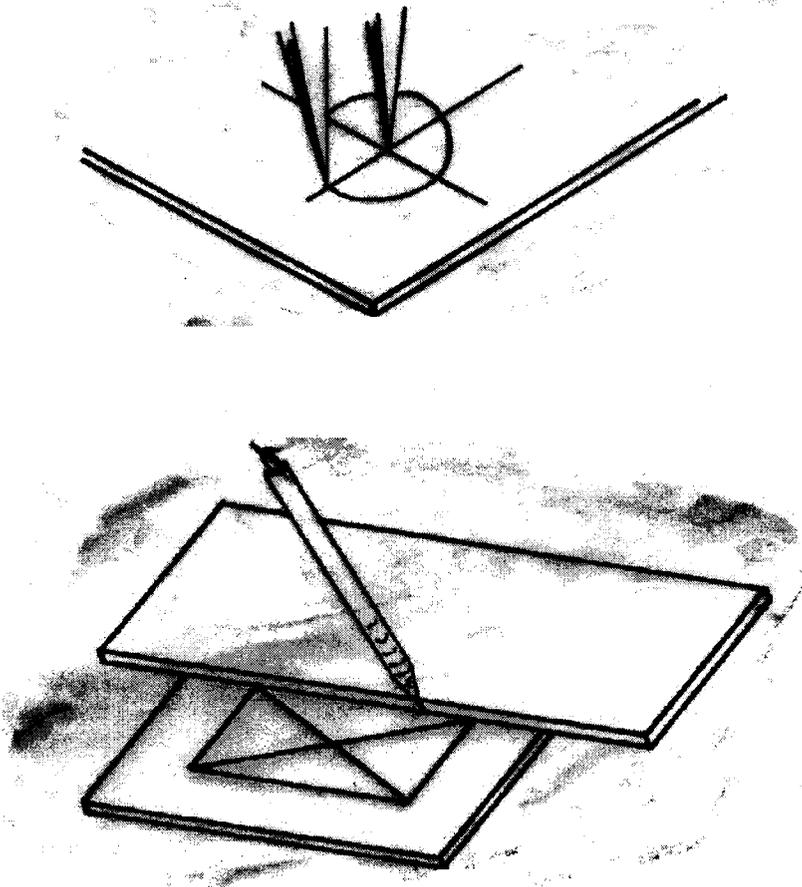
32.6.3 Risque as Laterais do Carretel.

Trace as medidas das abas e do carretel na fibra ou papelão a ser cortado e marque com um riscador.

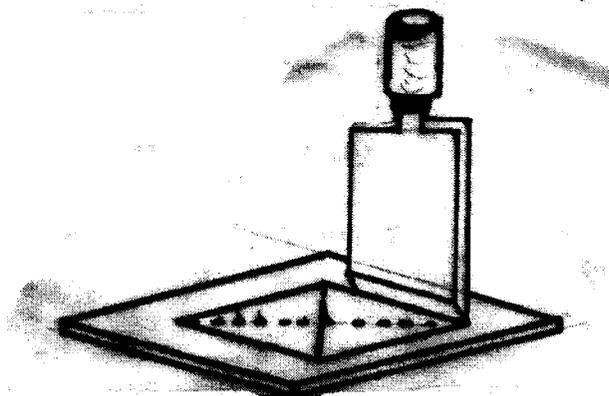
Não utilize lápis de grafite para riscar fibras isolantes, pois o grafite é bom condutor de eletricidade.

32.6.4 Recorte as Peças do Carretel.

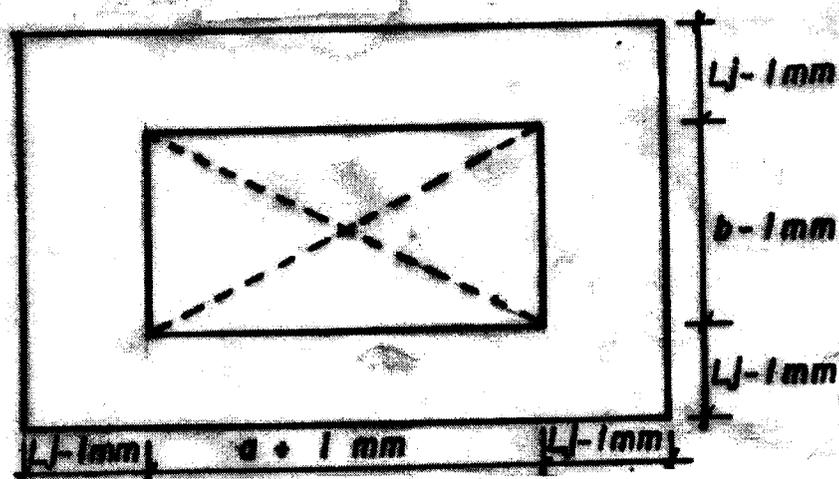
Faça os cortes externos com tesoura para chapas e os cortes internos com formão, de encontro a um cepo de madeira.



Nota: Nas abas circulares, faça os cortes internos com formão.

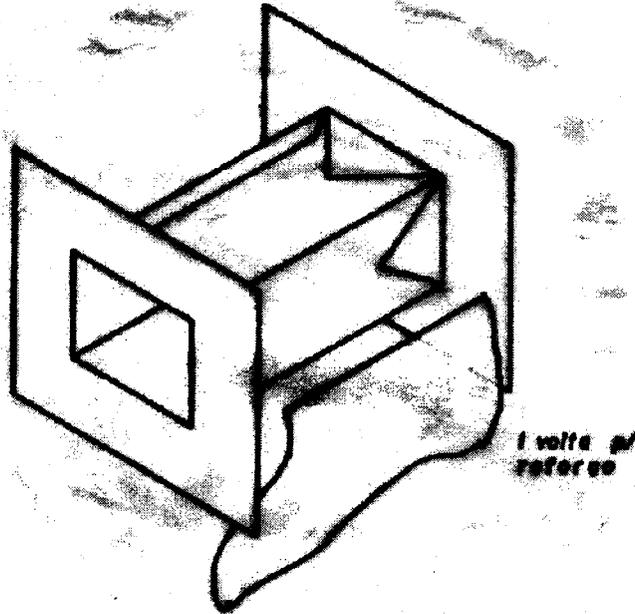


As medidas para confecção da lateral são mostradas na figura abaixo.



32.6.5 Montagem Final do Carretel.

As laterais deverão ser colocadas sobre o corpo do carretel e durante o processo de colagem deverão ser amarradas o que permite maior aderência ao conjunto. A formação final fica mostrada abaixo.



32.6.6 Montagem do Núcleo do Transformador.

Monte as chapas na bobina uma a uma e monte o núcleo. Alinhe os furos das chapas. Alterne o lado das chapas nas montagens do núcleo para que as emendas não fiquem coincidentes.

Cuidado para que as chapas não danifiquem o isolamento das bobinas.

33. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MARTIGNONI, Alfonso. Corrente Alternada. Globo. 1970, 354 p.
RIU, Agustín. Bobinados Eléctricos. A. Pena Lelo. 1972. 263 p.
VINIGRADOV. N. V. El bobinados de Máquinas Eléctricas, Moseu Mir, 1967. 404 p.
KOSOV, Stemer & Martignoni, Alfonso. Manual de tecnologia Eletromecânica, vol. I Globo. 1980. 288 p.
WALLACE. Gray. Principio e Aplicações de Eletrotécnica.
Roldan, José, Manual Del bobinador de máquinas eléctricas, CEAC, 1973, 268 P.
LUDWIG, Robert, Manual Práctico del bobinador electricista, SINTES, 1971, 191 p.
MARTIGNONI, Alfonso. Transformadores. Globo. 1970, 354 p.

Catálogos:

- a. Catálogo de condutores Pirelli;
- b. Filmes isolante Micaroll;
- c. Catálogo de Isolantes tubulares Plásticos Spagflex;
- d. Catálogo de transformadores WEG;
- e. Catálogo de transformadores SIEMENS.