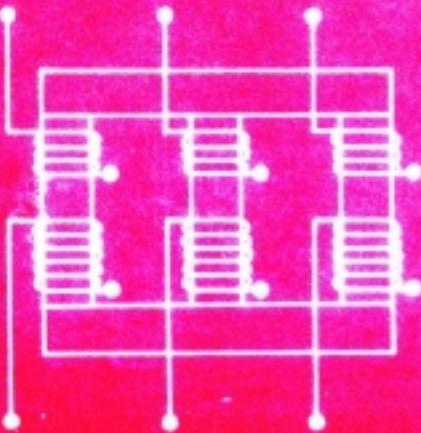


**alfonso
martignoni**

TRANSFORMADORES



TRANSFORMADORES

Obras do Autor

ELETROTECNICA

MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – TECNOLOGIA

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – OPERAÇÕES

MÁQUINAS SÍNCRONAS

CONSTRUÇÃO ELETROMECÂNICA

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS PREDIAIS

ALFONSO MARTIGNONI

Professor de Eletrotécnica, Máquinas Elétricas e Projetos na Escola Técnica Federal
“Celso Suckow da Fonseca”, da Guanabara

TRANSFORMADORES

6^a Edição
Revista



EDITORIA GLOBO
Porto Alegre • Rio de Janeiro
1983

Copyright © 1969 by ALFONSO MARTIGNONI

- 1.^a Edição – abril de 1971
- 2.^a Edição – março de 1974
- 3.^a Edição – agosto de 1977
- 4.^a Edição – fevereiro de 1979
- 5.^a Edição – agosto de 1981

Capa de
João Azevedo Braga

Direitos exclusivos de tradução, em língua portuguesa, da
Editora Globo S.A.
Av. Getúlio Vargas, 1271 — 90000 — Porto Alegre, RS
Rua Sarg. Silvio Hollenbach, 350 — 21510 — Rio de Janeiro, RJ

NOTA PRÉVIA

O livro TRANSFORMADORES é destinado principalmente a auxiliar os alunos da 3.^a série do Curso Técnico de Eletrotécnica e do Curso de Engenharia Operacional no que diz respeito a estrutura, princípio de funcionamento, características, aplicações e cálculo para projeto.

O livro trata de maneira simples e objetiva dos vários tipos de transformadores monofásicos, trifásicos, reguladores de tensão, transformadores para circuitos eletrônicos, bobinas de choque e transformadores especiais, tais como os de corrente constante e os trifásicos-monofásicos. Para cada tipo há um ou mais exemplos de cálculo completos, que, partindo dos dados gerais, fornecem todos os detalhes técnicos de construção, inclusive o peso do ferro e do cobre a ser empregado na fabricação. Com estas particularidades, o livro TRANSFORMADORES pretende ser efetivo auxiliar no processo da aprendizagem, facilitando a tarefa do professor e do aluno.

Os exemplos citados no livro referem-se a transformadores de pequena e média potência, pois estes são os que diariamente devem ser calculados e projetados por técnicos e engenheiros que operam na maioria das indústrias do País, tanto no ramo elétrico como no ramo eletrônico.

Para não tornar desnecessariamente volumoso o presente livro, não foram tratados nele os princípios básicos dos fenômenos elétricos e os da indução eletromagnética. Encontram-se, porém, passo a passo, em seu texto, referências ao livro ELETROTÉCNICA, do mesmo autor, cujo conteúdo constitui matéria estudada na primeira e segunda série, tanto do Curso Técnico como do Curso de Engenharia Operacional.

O autor, que há 32 anos vem procurando emprestar sua colaboração ao ensino técnico brasileiro, sentir-se-á feliz se este livro alcançar o seu objetivo, que é o de ser útil aos alunos dos cursos acima referidos.

Alfonso Martignoni

SUMÁRIO

NOTA PRÉVIA

VII

CAPÍTULO I

Transformadores monofásicos e trifásicos	1
1 — Necessidade da transformação das correntes alternadas	1
2 — Princípio de construção do transformador monofásico	1
3 — Princípio do funcionamento do transformador	3
4 — Princípio de construção do transformador trifásico	8
5 — Núcleos envolvidos e núcleos envolventes	12
6 — Tipos dos enrolamentos	16
7 — Construção dos enrolamentos B.T.	18
8 — Construção dos enrolamentos A.T.	21
9 — Resfriamento dos transformadores	22
10 — Perdas no ferro	24
11 — Corrente a vazio ou de excitação e sua forma	31
12 — Cálculo da corrente a vazio do transformador	32
13 — As correntes a vazio nos transformadores trifásicos	35
14 — Resistências ôhmicas e indutância de dispersão dos enrolamentos	37
15 — Diagramas vetoriais do transformador a vazio e com carga	40
16 — Circuito secundário equivalente	46
17 — Circuito primário equivalente	49
18 — Funcionamento do transformador em curto-círcuito e determinação experimental da resistência e da impedância equivalente	51
19 — O ensaio de curto-círcuito nos transformadores trifásicos ..	56
20 — Cálculo da reatância de dispersão dos transformadores ..	58
21 — Determinação da queda de tensão industrial — Diagrama de Kapp — Características externas do transformador	60
22 — Fórmulas práticas para o cálculo direto da queda de tensão industrial (regulação)	63
23 — Perdas no cobre	67
24 — Rendimento do transformador	69

CAPÍTULO II

25 — Considerações e dados para o projeto dos transformadores de pequena potência monofásicos	73
26 — Exemplos de cálculo de transformadores monofásicos	84

27 — Cálculo das bobinas de reatância	93
28 — Exemplos de cálculo das bobinas de reatância	95
29 — Cálculo dos transformadores de acoplamento	99
30 — Exemplos de cálculo dos transformadores de acoplamento ..	101

CAPÍTULO III

31 — Transformadores trifásicos em regime desequilibrado. — Aplicações características dos diferentes agrupamentos	105
32 — Considerações para o projeto dos transformadores de pequena potência, trifásicos, com refrigeração natural	111
33 — Exemplos de cálculo dos transformadores trifásicos com refrigeração natural	114
34 — Transformador especial com entrada trifásica e saída monofásica	117
35 — Exemplos de cálculo de transformadores especiais com entrada trifásica e saída monofásica	118
36 — Numeração dos bornes e relação de fase entre as tensões primárias e secundárias dos transformadores	122
37 — Agrupamento dos transformadores em paralelo	128
38 — Determinação do regime de funcionamento em paralelo de dois transformadores com características diferentes	133
39 — Curto-circuito accidental e poder de rotura da chave de proteção	136

CAPÍTULO IV

40 — Transformadores especiais com transformação do número das fases	139
41 — Transformador com corrente constante	140

CAPÍTULO V

42 — Autotransformadores	145
43 — Considerações e dados para o projeto dos autotransformadores de pequena potência monofásicos	149
44 — Exemplos de cálculo dos autotransformadores monofásicos	153
45 — Considerações e dados para o projeto dos autotransformadores de pequena potência trifásicos	157
46 — Exemplos de cálculo dos autotransformadores trifásicos ..	158
47 — Dispositivo para neutro artificial	161
48 — Exemplos de cálculo de dispositivos para neutro artificial	161

CAPÍTULO VI

49 — Regulador de tensão com comando manual	167
50 — Regulador de tensão com comando automático	169
51 — Exemplos de cálculos dos reguladores de tensão	171
52 — Estabilizadores automáticos de tensão	175

CAPÍTULO VII

Normas; definições e considerações sobre transformadores para redes de transmissão e de distribuição	179
53 — Normas	179
54 — Definições	179
55 — Potências nominais padronizadas	180
56 — Classe de tensão de isolamento	180
57 — Classe de isolamento	182
58 — Temperatura de referência e elevação da temperatura	182
59 — Tensão de curto-círcuito	183
60 — Corrente de excitação (corrente a vazio)	184
61 — Polaridade e deslocamento angular	184
62 — Regulação	184
63 — Rendimento	184
64 — Freqüência	184
65 — Placa de identificação	184
66 — Ensaios	185
67 — Finalidade dos ensaios de tensão	188
68 — Derivações	188
69 — Líquidos isolantes	192
70 — Tanques	193
71 — Tipos de resfriamento	196
72 — Aumento da potência nominal por meio da ventilação forçada	197
73 — Conservador de líquido	198
74 — Transformador operando com freqüência diferente da nominal	199
75 — Transformadores que operam a altitudes superiores a 1000 metros	200

CAPÍTULO VIII

Considerações e dados para o projeto dos transformadores de grande potência	203
76 — Isolamento dos condutores	203
77 — Subdivisão das perdas entre ferro e cobre	205
78 — Escolha da densidade de corrente e da indução	217

XII

79 — Tensão de curto-circuito e queda de tensão	217
80 — Cálculo da seção do núcleo	218
81 — Determinação das dimensões da janela	220
82 — Peso do núcleo	224
83 — Peso do cobre	225
84 — Cálculo das perdas	225

CAPÍTULO IX

Aquecimento dos transformadores	227
85 — Produção e transmissão do calor	227
86 — Resfriamento natural de transformadores secos com ar (SN)	227
87 — Resfriamento de transformadores secos com ventilação forçada (SVF)	230
88 — Resfriamento de transformadores em óleo, com ventilação natural (LN)	231
89 — Resfriamento de transformadores em óleo com ventilação artificial (LN-VF)	235
90 — Resfriamento de transformadores em óleo com serpentina de água interna (LN-ACF)	235
91 — Resfriamento de transformadores em óleo com circulação em água externa	236
92 — Aquecimento do material ativo	236

CAPÍTULO X

Exercícios de aplicação	239
93 — Projeto de transformador trifásico de 5000 kVA em óleo	239
94 — Projeto de transformador trifásico de 30 kVA em óleo	251
95 — Transformadores monofásicos de distribuição, com núcleo espiral	263
96 — Projeto de transformador de distribuição, monofásico, com núcleo espiral e enrolamento tubular duplo	267
97 — Transformadores monofásicos de distribuição em óleo com núcleo convencional e lâminas de ferro-silício comum	275
98 — Projeto de transformador monofásico em óleo com núcleo envolvente de lâminas comuns e enrolamento tubular duplo	276
99 — Projeto de transformador monofásico em óleo com núcleo envolvente de lâminas comuns e enrolamento tubular simples	283
100 — Projeto de transformador monofásico em óleo, com núcleo envolvido de lâminas comuns e enrolamento tubular simples distribuído nas duas colunas	292
101 — Comparação dos resultados dos projetos	300
Índice Alfabético Remissivo	301

CAPÍTULO I

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS

1) NECESSIDADE DA TRANSFORMAÇÃO DAS CORRENTES ALTERNADAS

As exigências técnicas e econômicas impõem a construção de grandes usinas elétricas, em geral situadas muito longe dos centros de aproveitamento, pois devem utilizar a energia hidráulica dos lagos e rios das montanhas. Surge assim a necessidade do transporte da energia elétrica por meio de linhas de comprimento notável.

Por motivos econômicos e de construção, as seções dos condutores destas linhas devem ser mantidas dentro de determinados limites, o que torna necessária a limitação da intensidade das correntes nas mesmas. Assim sendo, as linhas deverão ser construídas para funcionar com uma tensão elevada, que em certos casos atinge a centenas de milhares de volts.

Estas realizações são possíveis em virtude de a corrente alternada poder ser transformada facilmente de baixa para alta tensão e vice-versa, por meio de uma máquina estática, de construção simples e rendimento elevado, que é o transformador.

Os geradores instalados nas usinas geram a energia elétrica com a tensão de aproximadamente 6000 volts. Para efetuar-se o transporte desta energia, eleva-se a tensão a um valor oportuno por meio de um transformador-elevador.

Na chegada da linha, outro transformador executa a função inversa, isto é, reduz a tensão ao valor necessário para a utilização.

Podem então ser escolhidas as três tensões, isto é, de geração, de transporte e de distribuição, com plena liberdade, dando-se a cada uma o valor que se apresenta mais conveniente.

Naturalmente, nestas transformações o valor da intensidade de corrente sofrerá a transformação inversa à da tensão, pois o produto das mesmas, isto é, a potência elétrica, deve ficar inalterada.

2) PRINCÍPIO DE CONSTRUÇÃO DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Conforme consta no livro *Eletrotécnica*, parágrafo 133, o funcionamento do transformador baseia-se nos fenômenos de Mútua indução entre dois circuitos eletricamente isolados mas magneticamente ligados. Para que a ligação magnética entre os dois circuitos mencionados seja a mais perfeita possível, é necessário que estes estejam enrolados sobre um

núcleo magnético de pequena relutância. Este núcleo deverá ter elevada permeabilidade e por isso seus entreferros devem ser muito reduzidos. Por motivos de construção este núcleo possui a forma indicada na fig. 1, e sendo destinado a canalizar um fluxo alternado deve ser realizado por um pacote de lâminas de ferro oportunamente isoladas.

Aplicando-se nos extremos de qualquer destes enrolamentos a tensão alternada que se quer transformar V_1 , gera-se nos extremos do outro a tensão transformada V_2 . A relação entre estas duas tensões chama-se relação de transformação do transformador, a qual, como se verá, é pouco diferente da relação entre o número das espiras N_1 e N_2 dos dois enrolamentos.

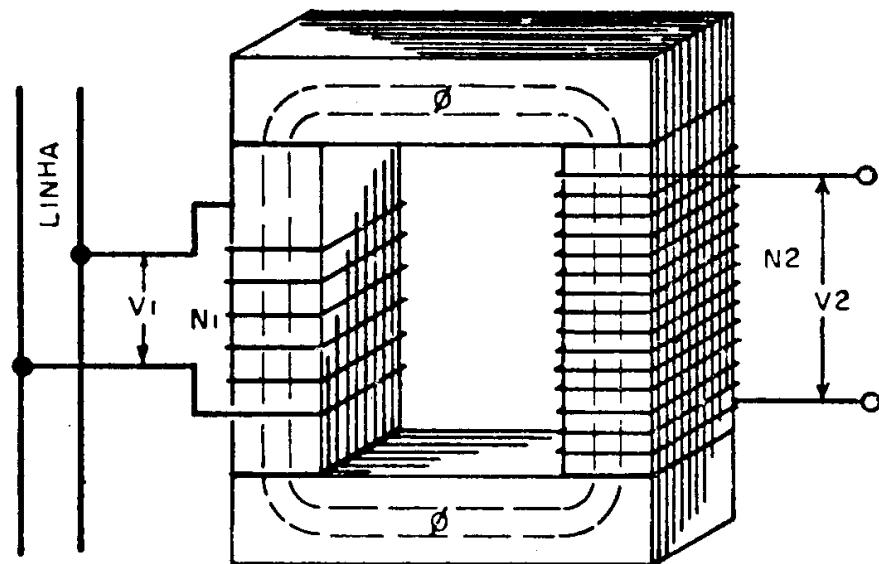


Fig. 1

O enrolamento alimentado pela tensão V_1 que se quer transformar chama-se enrolamento primário e o outro, que fornece a tensão transformada V_2 , chama-se enrolamento secundário. Analogamente, as duas tensões V_1 e V_2 são denominadas comumente de tensão primária e secundária. As correntes I_1 e I_2 que atravessarão os dois enrolamentos constituem as correntes primária e secundária do transformador. Como se sabe, os fenômenos de mútua indução são reversíveis, portanto nenhuma distinção pode ser feita entre os circuitos primário e secundário, pois os dois enrolamentos podem funcionar indiferentemente como primário ou secundário, bastando alimentar um ou outro. Construtivamente os dois enrolamentos denominam-se enrolamento de alta tensão (A.T.) o que tem maior número de espiras e enrolamento de baixa tensão (B.T.) o que tem menor número de espiras.

O transformador funcionará como elevador de tensão quando se alimenta como primário o enrolamento B.T. e pelo contrário funciona como redutor de tensão quando se alimenta o enrolamento A.T.

3) PRINCIPIO DO FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR

Para poder-se facilmente entender o princípio do funcionamento do transformador, é necessário analisar um transformador ideal, no qual sejam nulas as resistências elétricas dos enrolamentos, as perdas no ferro e as dispersões magnéticas.

Considera-se antes o funcionamento a vazio e depois com carga: o primeiro caso verifica-se quando se aplica ao enrolamento primário uma tensão V_1 deixando o enrolamento secundário aberto; o segundo caso verifica-se quando o enrolamento secundário é efetivamente utilizado para alimentar um determinado circuito.

a) Funcionamento a vazio

Seja V_1 o valor eficaz da tensão alternada com freqüência f , aplicada nos extremos do enrolamento primário e seja N_1 o número das espiras deste enrolamento.

Sendo o enrolamento secundário aberto, não é percorrido por nenhuma corrente, ficando inativo. Tendo suposto nula a resistência ôhmica, o enrolamento primário comporta-se como um circuito puramente indutivo. Este absorverá, portanto, determinada corrente I_μ , defasada de 90° em atraso com respeito à tensão aplicada V_1 . Esta corrente produzirá um fluxo Φ que, na hipótese feita, fica totalmente canalizado no núcleo. Este fluxo é evidentemente um fluxo alternado que varia com a mesma fase da corrente I_μ que o produz.

Se Φ_M é o valor máximo deste fluxo e $\omega = 2\pi f$ (sua pulsação) ele induz, como é sabido, em cada espira que o abraça uma f.e.m. cujo valor máximo é de $10^{-8} \omega \Phi_M$. Esta f.e.m. é defasada de 90° em atraso com respeito ao fluxo, conforme mostra o diagrama da fig. 2.

No enrolamento primário composto de N_1 espiras agrupadas em série, gera-se uma f.e.m. (primária) que adquire o seu valor máximo:

$$E_{1M} = 10^{-8} \omega \Phi_M N_1$$

Esta f.e.m. é representada no diagrama pelo vetor E_1 a 90° em atraso com respeito ao vetor Φ que representa o fluxo. Analogamente o mesmo fluxo induz no outro enrolamento composto por N_2 espiras, a f.e.m. secundária cujo valor máximo será:

$$E_{2M} = 10^{-8} \omega \Phi_M N_2$$

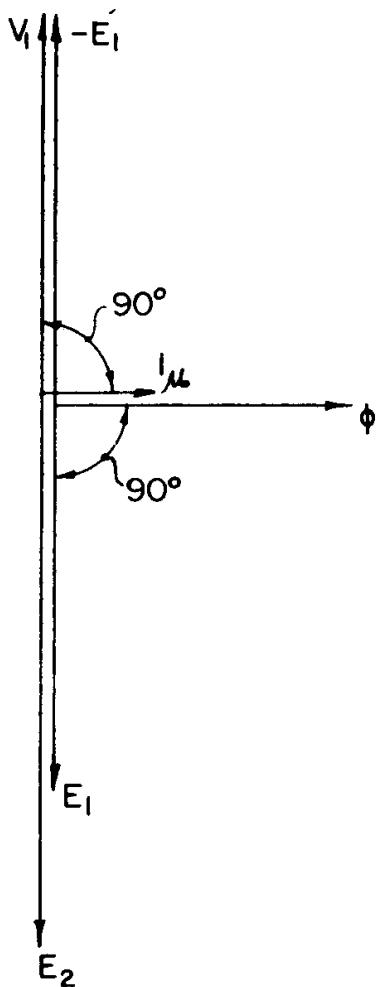


Fig. 2

Esta f.e.m. é representada no diagrama pelo vetor E_2 a 90° em atraso com respeito a Φ e portanto em fase com E_1 .

Os valores eficazes das duas f.e.m., primária e secundária, são dados por

$$E_1 = 10^{-8} \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_M \cdot N_1 = \\ = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_M \cdot N_1$$

$$E_2 = 10^{-8} \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_M \cdot N_2 = \\ = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_M \cdot N_2$$

De onde dividindo-se membro a membro obtém-se:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

isto é, as duas f.e.m., primária e secundária, estão entre si na relação direta dos números das espiras dos respectivos enrolamentos.

O diagrama evidencia que as f.e.m. induzidas nos dois enrolamentos resultam em oposição de fase com a tensão primária. Portanto, a f.e.m., primária, E_1 reage sobre a tensão aplicada V_1 como uma força contrateletrromotriz (f.c.e.m.).

Tendo suposto nula a resistência ôhmica, e portanto nula a queda de tensão correspondente, e nulas as dispersões magnéticas, deverá resultar $V_1 = \sim E_1$. Esta condição determina o valor do fluxo que deve produzir-se no núcleo, pois devendo resultar $E_1 = \sim V_1$ o fluxo no núcleo deverá adquirir o valor máximo Φ_M que fica determinado pela relação

$$\Phi_M = 10^8 \cdot \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1}$$

Se é fixada a tensão primária V_1 , o fluxo no núcleo é completamente independente da forma e da relutância do sistema, a qual intervirá somente para determinar o valor da corrente magnetizante I_μ necessária a produzi-lo.

Se R é a relutância do núcleo, correspondente ao valor máximo Φ_M do fluxo, a corrente I_μ deve alcançar um valor máximo $I_{\mu M}$ que fica determinado pela relação

$$N_1 I_{\mu M} = \Phi_M R.$$

Pode-se dizer, então, que no funcionamento em vazio do transformador a tensão V_1 aplicada ao enrolamento primário produz um fluxo que por sua vez gera no enrolamento primário a f.c.e.m. E_1 igual e contrária à tensão aplicada. Este fluxo é produzido pela corrente magnetizante I_μ ; defasada de 90° em atraso sobre a tensão V_1 .

Para se reduzir esta corrente ao menor valor possível, é necessário que a relutância do núcleo seja a menor possível.

No transformador ideal, a f.e.m. primária E_1 foi considerada igual à tensão aplicada V_1 . Substituindo-se a f.e.m. secundária E_2 pela tensão que se manifesta nos extremos do circuito secundário V_2 (com circuito aberto) pode-se escrever

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Isto quer dizer que, aplicando ao circuito primário a tensão V_1 , nos bornes do secundário manifesta-se a tensão $V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$. Construindo-

se o enrolamento secundário com elevado número de espiras em relação ao primário, pode-se obter uma tensão secundária elevada, mesmo que a tensão primária seja muito pequena. Inversamente, alimentando-se o enrolamento possuidor de muitas espiras com uma tensão elevada, pode-se obter no outro enrolamento uma tensão reduzida.

Existe, assim, a possibilidade de realizar qualquer relação de transformação unicamente fixando convenientemente a relação das espiras $\frac{N_1}{N_2}$; nos transformadores esta relação coincide com a relação $\frac{E_1}{E_2}$; enquanto a relação $\frac{V_1}{V_2}$ resulta, como será visto mais tarde, um pouco diferente em consequência das quedas de tensão nos enrolamentos.

b) Funcionamento com carga

Se os bornes do enrolamento secundário são ligados a uma impedância (que se supõe de caráter indutivo), como indica a fig. 3, a f.e.m. E_2 faz circular nesta a corrente I_2 , que resultará defasada com respeito à f.e.m.

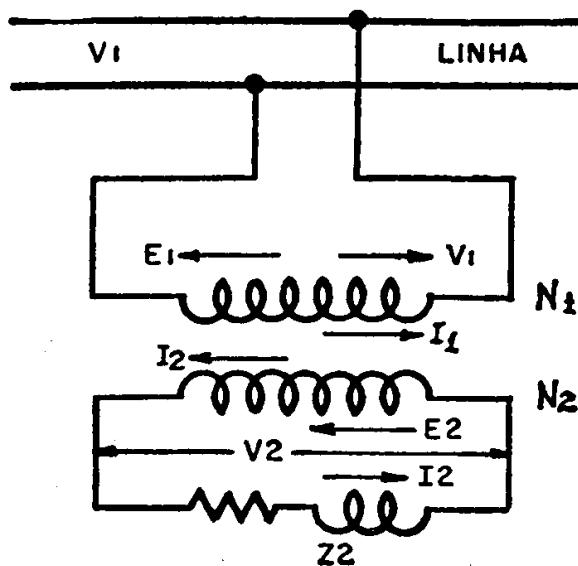


Fig. 3

de certo ângulo ϕ_2 , conforme diagrama vetorial da fig. 4. Esta corrente secundária, circulando nas espiras do enrolamento correspondente, produz sobre o núcleo uma força magneto-motriz expressa por: $N_2 I_2$ em fase com I_2 , a qual tende evidentemente a alterar o fluxo produzido pela força magneto-motriz $N_1 I_\mu$. Nestas condições, alteram-se as f.e.m. induzidas nos dois enrolamentos, o que produz no circuito primário um desequilíbrio entre a tensão aplicada V_1 e a f.e.m. contrastante E_1 .

O enrolamento primário absorverá uma corrente mais elevada. A nova corrente absorvida deverá ser tal que possa restabelecer o equilíbrio preexistente entre a tensão aplicada V_1 e a correspondente f.e.m. É fácil compreender, portanto, que começando a circular uma corrente I_2 no circuito secundário, no enrolamento primário é imedia-

tamente chamada, além da precedente corrente magnetizante I_μ uma nova corrente I_1' cuja f.m.m. $N_1 I_1'$ se destina a equilibrar a f.m.m. secundária $N_2 I_2$.

Sobre o diagrama vetorial da fig. 4 ao vetor $N_2 I_2$ contrapõe-se assim o vetor igual e oposto $N_1 I_1'$ e consequentemente a f.m.m. resultante será ainda a precedente $N_1 I_\mu$ e o fluxo no núcleo adquire, portanto, o seu valor inicial Φ . Restabelece-se assim o equilíbrio entre a tensão aplicada ao enrolamento primário V_1 e a f.e.m. que a contrasta E_1 .

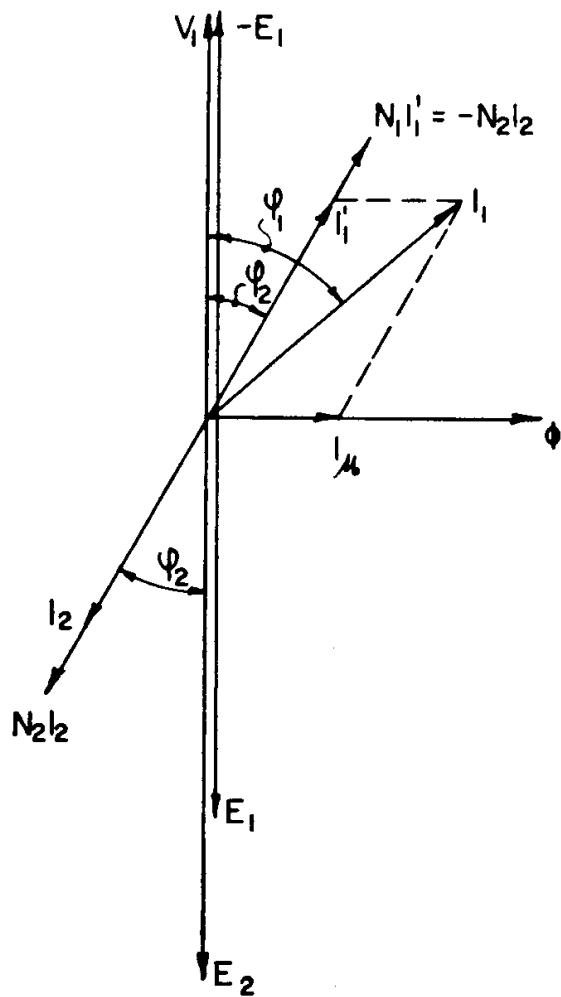


Fig. 4

Pode-se então dizer que o regime de funcionamento do transformador é determinado pela necessidade da f.e.m. E_1 resultar constantemente igual e oposta à tensão aplicada V_1 . Se esta última é mantida constante, também a f.e.m. E_1 deve ser constante, e por isso deve ficar inalterado o valor do fluxo no núcleo, qualquer que seja a corrente I_2 fornecida pelo enrolamento secundário. Esta necessidade obriga o enrolamento primário a absorver, da linha que o alimenta, além da corrente magnetizante I_μ , necessária à produção do fluxo, também outra corrente I_1' cuja f.m.m. resulta constantemente igual e oposta à f.m.m. produzida pela corrente secundária. Em cada condição da carga deve, portanto, resultar $N_1 I_1' = N_2 I_2$.

A corrente I_1' absorvida pelo enrolamento primário, a fim de vencer a reação magnética provocada pela corrente fornecida pelo secundário, chama-se corrente primária de reação, sendo representada sobre o diagrama por um valor I_1' diretamente oposto ao vetor da corrente secundária I_2 e o seu valor eficaz é determinado pela relação $N_1 I_1' = N_2 I_2$

$$\text{de onde resulta: } I_1' = \frac{N_2}{N_1} I_2 \text{ ou } \frac{I_2}{I_1'} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Resulta que a corrente secundária I_2 e a corrente primária de reação I_1' estão entre si na relação inversa dos números das espiras dos respectivos enrolamentos, portanto também na relação inversa das duas f.e.m. correspondentes.

Pode-se então dizer que no transformador com carga a transformação que se verifica entre as f.e.m. primária e secundária é acompanhada pela transformação inversa entre a corrente secundária I_2 e a correspondente corrente primária de reação I_1' .

Deste fato resulta a necessária igualdade que deve existir, desprezando-se as perdas, entre a potência elétrica fornecida pelo enrolamento secundário e a potência que é correspondentemente absorvida pelo enrolamento primário.

Dos fatos expostos conclui-se que em um transformador com carga, quando o enrolamento secundário fornece determinada corrente I_2 , o enrolamento primário absorve, da linha que o alimenta, uma corrente total I_1 , que é a resultante da corrente magnetizante I_μ e da corrente

$$\text{de reação } I_1' = - I_2 \frac{N_2}{N_1}.$$

Esta corrente I_1 constitui a corrente primária que corresponde à corrente secundária considerada. A corrente I_1 resulta defasada com respeito à tensão $V_1 = -E_1$ de um ângulo ϕ_1 ; o qual depende do valor e da defasagem ϕ_2 da corrente secundária.

Variando a carga do transformador, isto é, variando a corrente fornecida pelo enrolamento secundário, fica inalterada a corrente magnetizante I_μ , mas varia junto à corrente I_2 a corrente primária de re-

ção I_1' . Quando o transformador trabalha com carga reduzida, isto é, com uma pequena corrente secundária, também a corrente de reação é pequena e, portanto, a corrente total primária I_1 tende a aproximar-se da corrente magnetizante I_μ e o ângulo φ_1 aproxima-se de 90° . Quando, pelo contrário, o transformador trabalha a plena carga, acontece que a corrente magnetizante I_μ resulta muito pequena com respeito à corrente de reação I_1' e portanto a corrente total primária I_1 é quase igual à corrente I_1' e pode-se escrever

$$\frac{I_1}{I_2} = \sim \frac{N_2}{N_1}$$

Assim sendo, desprezando-se a influência da corrente magnetizante, é possível expressar a corrente primária total a plena carga pela relação

$$I_1 = \sim \frac{N_2}{N_1} I_2.$$

Com carga reduzida a corrente magnetizante não pode ser desprezada e a relação antes escrita refere-se somente à corrente de reação I_1' .

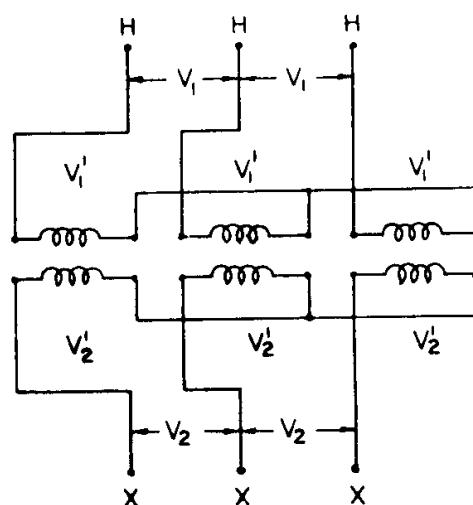
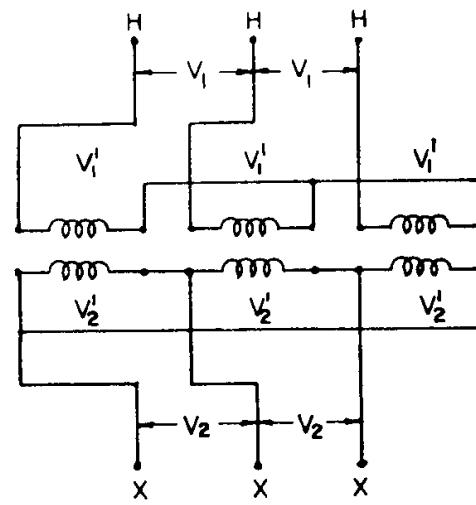
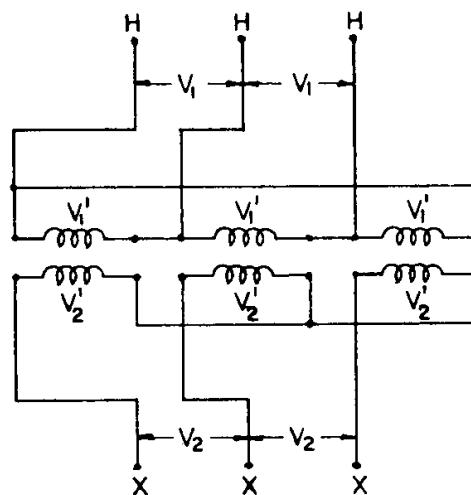
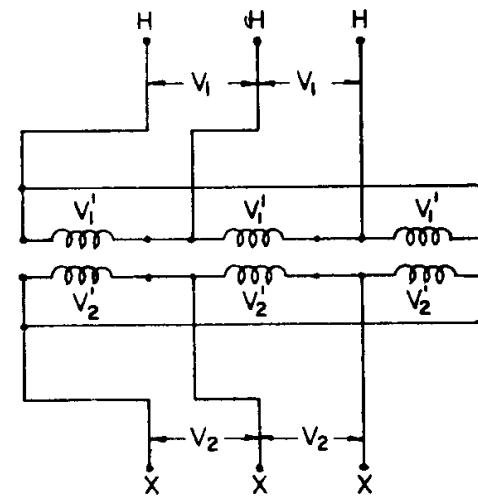
4) PRINCIPIO DE CONSTRUÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Para a transformação dos sistemas trifásicos podem-se empregar três transformadores monofásicos distintos e iguais entre si. Os três enrolamentos primários destes transformadores serão alimentados pela linha trifásica primária através de agrupamento em estrela ou triângulo. Dos três enrolamentos secundários que são também agrupados em estrela ou triângulo, sai a linha trifásica secundária. Podem-se realizar os quatro esquemas de agrupamento da fig. 5.

Em qualquer dos casos a relação de transformação é considerada como a relação entre a tensão de linha primária V_1 e a tensão de linha secundária V_2 . Conforme o agrupamento, as tensões primárias e secundárias V_1' e V_2' relativas a cada transformador monofásico adquirem os valores indicados na fig. 5, em correspondência a cada esquema.

O emprego de transformadores monofásicos para sistemas trifásicos é limitado a casos especiais. Comumente, pela transformação dos sistemas trifásicos, empregam-se transformadores trifásicos, os quais são obtidos da reunião sobre o mesmo núcleo trifásico dos três transformadores monofásicos antes considerados.

O princípio sobre o qual são baseadas a possibilidade e a conveniência de se executar esta reunião de circuitos magnéticos relativos às três fases em um único conjunto é ilustrado na fig. 6.

(a) Y/Y ; $V_1' = \frac{V_1}{\sqrt{3}}$; $V_2' = \frac{V_2}{\sqrt{3}}$ (b) Y/Δ ; $V_1' = \frac{V_1}{\sqrt{3}}$; $V_2' = V_2$ (c) Δ/Y ; $V_1' = V_1$; $V_2' = \frac{V_2}{\sqrt{3}}$ (d) Δ/Δ ; $V_1' = V_1$; $V_2' = V_2$

Agrupamento "estrela - estrela"

 Y/Y ; esquema (a)

Agrupamento "estrela - triângulo"

 Y/Δ ; esquema (b)

Agrupamento "triângulo - estrela"

 Δ/Y ; esquema (c)

Agrupamento "triângulo - triângulo"

 Δ/Δ ; esquema (d)

Fig. 5

Os três núcleos monofásicos estão agrupados em estrela, isto é, cada coluna externa abriga tanto o enrolamento primário como o secundário de uma fase. A coluna central é desprovida de enrolamentos. Se os

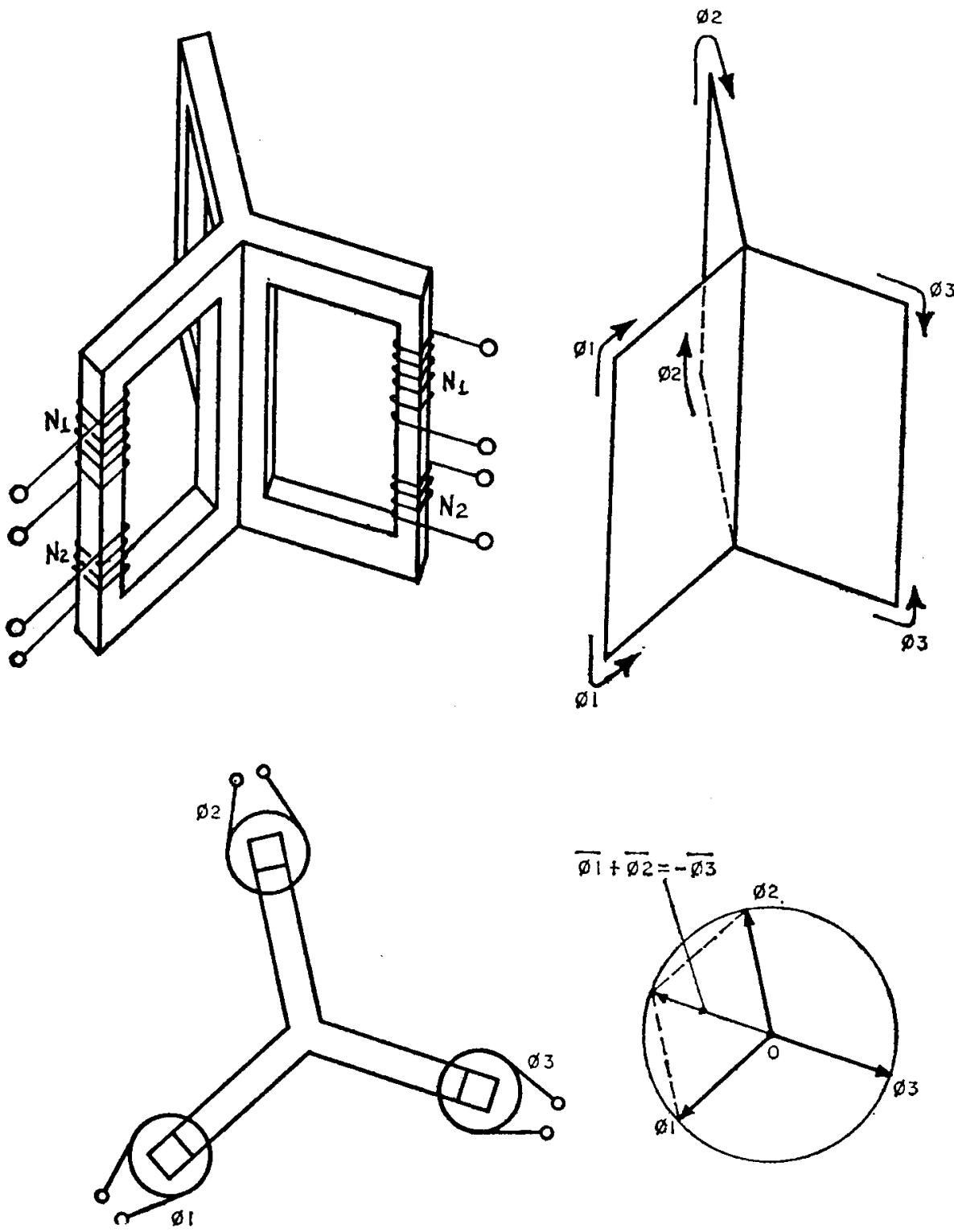


Fig. 6

três enrolamentos primários possuem o mesmo número de espiras N_1 e são alimentados por três tensões iguais e defasadas de 120° entre si, também os fluxos Φ_1 , Φ_2 e Φ_3 nas três colunas externas resultam iguais

entre si e defasados a 120° um com respeito ao outro. A resultante destes três fluxos é nula e, portanto, a coluna central não é atravessada por fluxo magnético, o que permite eliminá-la sem que a distribuição dos fluxos nas colunas remanescentes resulte alterada. No caso exposto, cada coluna é atravessada por um fluxo igual e oposto à resultante dos outros dois fluxos; cada coluna, portanto, funcionará como retorno dos fluxos relativos às outras duas colunas.

Com a eliminação da coluna central, e dada a necessidade da construção laminada, o núcleo trifásico pode ser realizado segundo a disposição de construção da fig. 7. Com esta disposição consegue-se a vantagem de diminuir notavelmente o peso. O núcleo trifásico assim realizado resulta perfeitamente simétrico com relação às três colunas e os circuitos magnéticos das três fases apresentam a mesma relutância. As correntes magnetizantes relativas às três colunas resultarão, portanto, iguais entre si, isto é, constituem um sistema trifásico simétrico e equilibrado. O núcleo assim construído é porém de construção difícil e é usado somente em casos especiais.

Nos transformadores trifásicos normais, com intuito de simplificar a construção, abandona-se a condição de simetria, que praticamente não tem importância, e dá-se ao núcleo a forma indicada na fig. 8. As três colunas são assim colocadas no mesmo plano para ligá-las entre si com uma simples travessa inferior e uma superior. No conjunto assim constituído os fluxos nas três colunas devem ainda resultar iguais entre si e defasados a 120° , pois cada um destes fluxos deve necessariamente induzir no respectivo enrolamento pri-

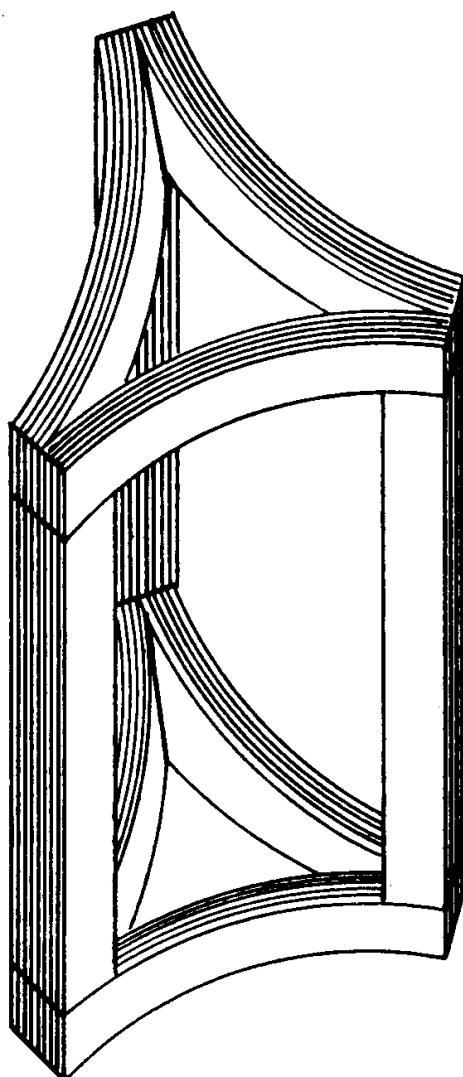


Fig. 7

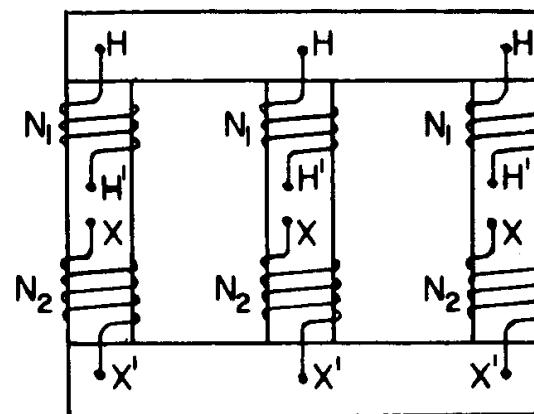


Fig. 8

mário uma f.e.m. igual e contrária à tensão aplicada. A relutância das três colunas adquire valores diferentes, sendo o da coluna central inferior aos das colunas laterais. As correntes magnetizantes também serão diferentes entre si, resultando as duas correntes magnetizantes relativas às colunas laterais levemente maiores que a corrente magnetizante da coluna central.

Este desequilíbrio das correntes manifesta-se somente no funcionamento a vazio do transformador, pois no funcionamento com carga as correntes magnetizantes I_μ relativas às três fases resultam desprezíveis com respeito às correntes primárias de reação I_1' .

Excluindo-se este desequilíbrio, pode-se afirmar que o funcionamento do transformador trifásico em regime normal não difere substancialmente dos três transformadores monofásicos distintos, com idêntica ligação entre as fases. Em cada coluna do transformador trifásico pode-se então traçar um diagrama idêntico ao já considerado para o transformador monofásico.

5) NÚCLEOS ENVOLVIDOS E NÚCLEOS ENVOLVENTES

Existem na prática dois tipos de circuitos magnéticos para transformadores, isto é, os de núcleo envolvido e os de núcleo envolvente.

O núcleo envolvido possui a forma indicada na fig. 9 *a* e *b* respectivamente para o transformador monofásico e o trifásico. Neste tipo de núcleo os enrolamentos colocados sobre as colunas envolvem o respectivo circuito magnético sem serem envolvidos por este.

O núcleo envolvente, pelo contrário, adquire a forma indicada na fig. 9 *c* para o transformador monofásico e na fig. 9 *d* para o trifásico.

Neste tipo de núcleo os enrolamentos envolvem o respectivo circuito magnético, ficando porém envolvidos por este. Os enrolamentos ficam quase totalmente cobertos pelo núcleo, de onde surgiu também o nome de núcleo encouraçado.

Os núcleos dos transformadores são construídos com lâminas de ferro sílico com 1,5 a 3% de silício, com a espessura de 0,5 mm e 0,3 mm.

Para tornar mínima a corrente magnetizante I_μ necessária para a produção de fluxo, seria aconselhável construir os núcleos com lâminas cortadas numa só peça para evitar os entreferros nas junções. Neste caso seria necessário enrolar os circuitos diretamente sobre o núcleo. Por motivos de construção, é preferível executar os enrolamentos separadamente sobre formas apropriadas, para colocá-los depois sobre os núcleos. Daí resulta a necessidade de construir o núcleo em partes separadas para compô-las depois de montados os enrolamentos.

A divisão do núcleo pode ser realizada de várias maneiras, mas nos núcleos dos transformadores industriais é sempre executada a divisão entre as colunas e as travessas.

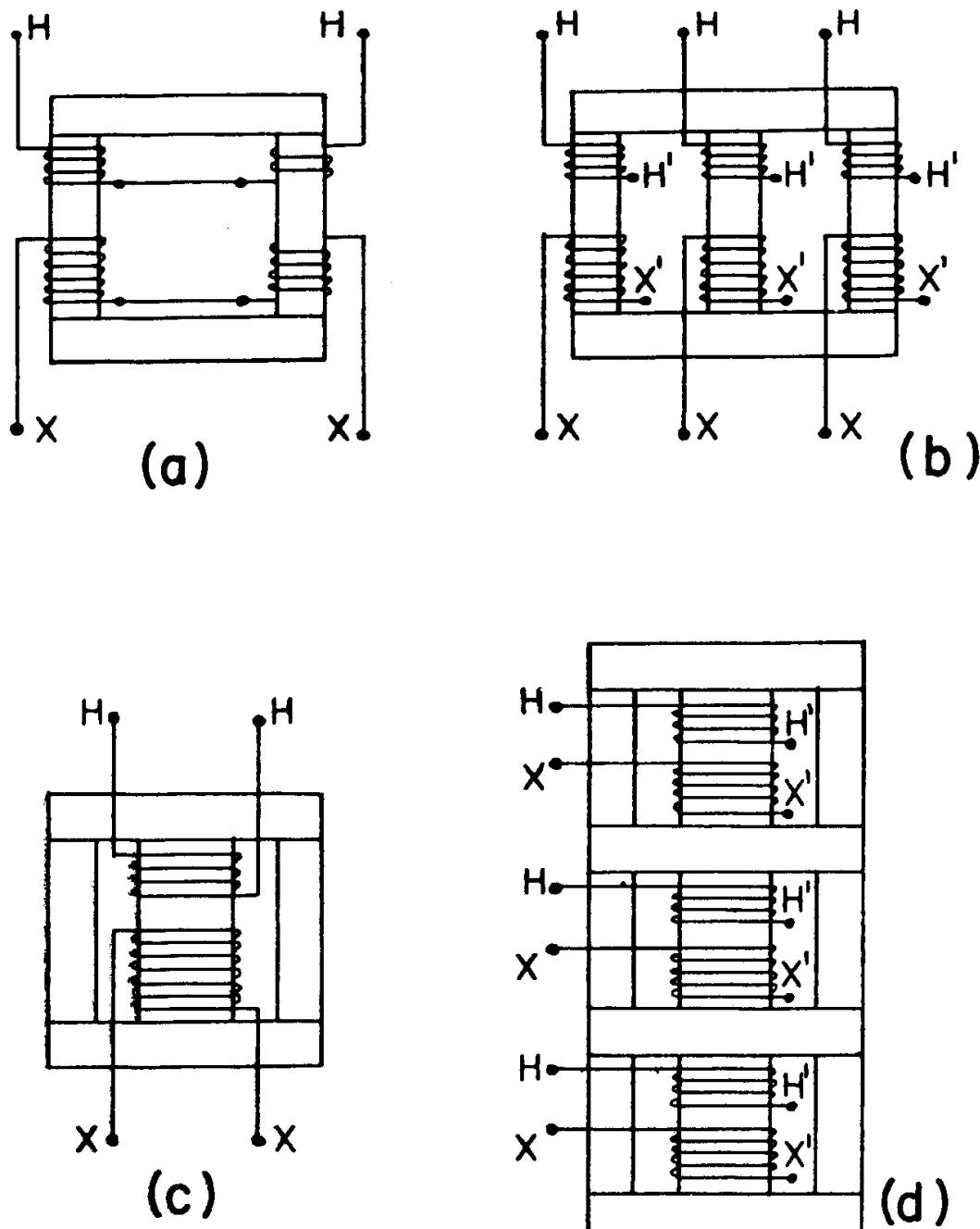


Fig. 9

A união das colunas e das travessas pode ser feita de duas maneiras, isto é, com juntas frontais e juntas encaixadas.

Na construção de juntas frontais, constroem-se separadamente um do outro os pacotes de lâminas que devem constituir, respectivamente, as colunas e as travessas para depois serem unidas por parafusos. A fim de se reduzirem as perdas no ferro, em cada junta deve ser interposta uma folha de papel isolante, como é indicado na fig. 10 a. Isto evita que as

lâminas das travessas possam estabelecer pontos de contato entre as lâminas das colunas, constituindo assim uma superfície metálica contínua, a qual permitiria a livre circulação de correntes parasitas muito intensas.

A presença da folha de papel isolante, com a espessura de 1/10 a 2,5/10 mm constitui um entreferro que aumenta a relutância da junta e, por conseguinte, a corrente magnetizante necessária ao transformador.

Este inconveniente é eliminado com a construção de juntas encaixadas, as quais são obtidas colocando-se as lâminas como é indicado na fig. 10 b: cada plano de lâminas constitui um circuito magnético distinto e isolado dos outros laterais. Praticamente, a composição dos núcleos com juntas encaixadas é realizada cortando-se e dispondo-se as lâminas como é indicado na fig. 10 c pelos núcleos monofásicos e na fig. 10 d pelos trifásicos; as duas figuras 10 c e d indicam a disposição das lâminas na primeira camada: sobre esta dispõe-se uma segunda camada com as lâminas deslocadas, respectivamente, como indicam as figs. 10 c' e d', e depois uma terceira camada igual à primeira e assim sucessivamente.

É evidente que a montagem das juntas encaixadas é muito mais custosa que as juntas frontais, pois obriga a enfiar as lâminas nos enrolamentos uma por uma. Isto assegura, porém, menor relutância do núcleo.

Alguns construtores adotam a solução intermediária, empregando juntas encaixadas pela travessa inferior e frontais pela superior.

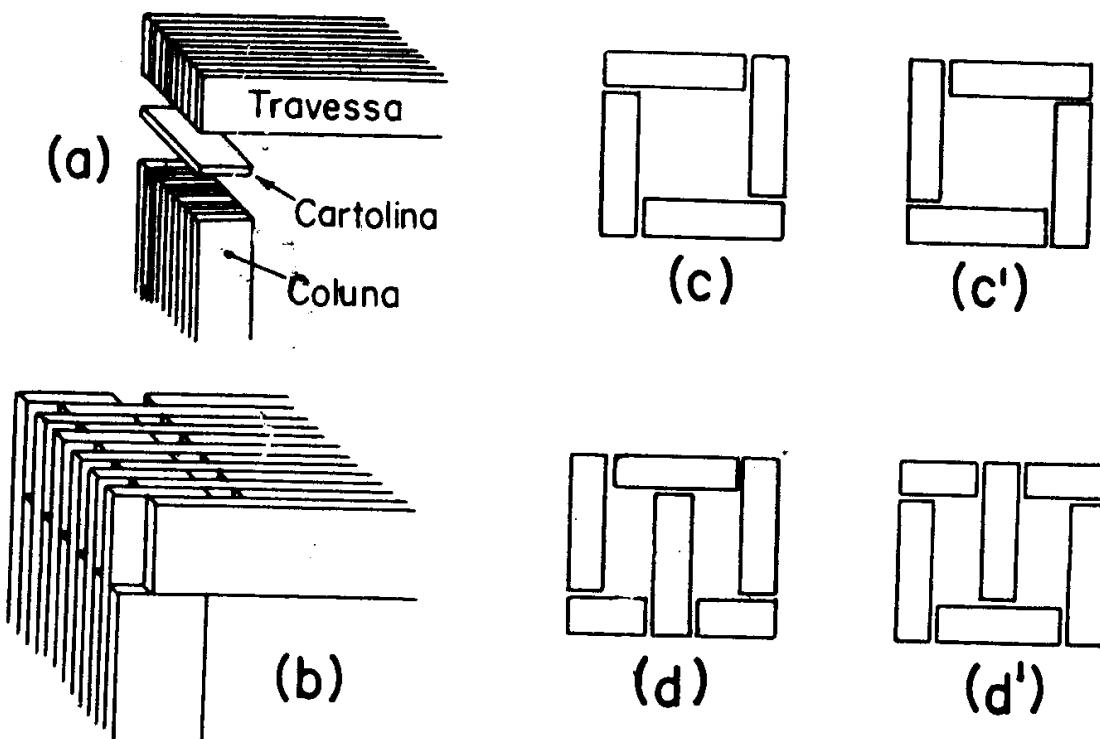


Fig. 10

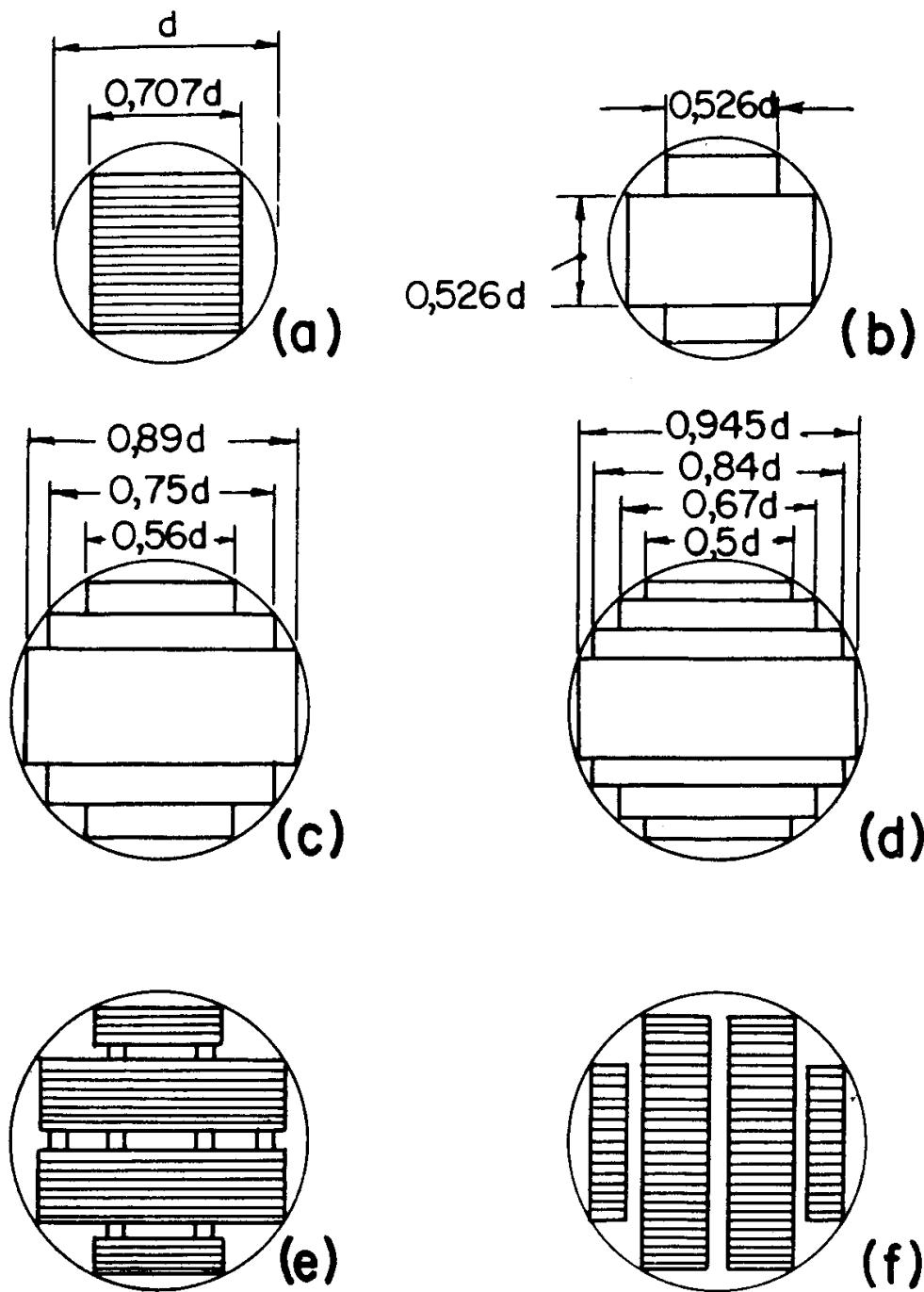


Fig. 11

Sendo os enrolamentos construídos com bobinas circulares, seria conveniente construir as colunas com este perfil. Porém, para não cortar as lâminas com larguras diferentes, constroem-se as colunas com seção em cruz, para transformadores de média potência, e com seção de dois ou mais degraus para transformadores maiores. Para pequenos transformadores usa-se em geral a seção quadrada (fig. 11 a). Supondo-se

as lâminas com 0,35 mm de espessura e o coeficiente de enchimento $K_t = 0,87$, a relação entre a seção pura do ferro e a superfície do círculo circunscrito ao núcleo é $S_t = 0,58$. Para transformadores de média potência, escolhe-se a seção em cruz (fig. 11 b), na qual o melhor aproveitamento da superfície do círculo circunscrito resulta das dimensões indicadas na figura, e o coeficiente $S_t = 0,71$ para lâminas de 0,35 mm de espessura. Colunas com seções muito grandes, são construídas em degraus (fig. 11 c e d). Se a superfície externa do núcleo não é suficiente para irradiar o calor, subdivide-se o pacote laminado em pacotes com espessura de 60 a 100 mm, separados por canais de 10 mm de espessura, conforme fig. 11 e e f. Na fig. 11 e os canais de refrigeração são paralelos às lâminas e, portanto, apresentam vantagem de fixação dos pacotes elementares, mas esta disposição é menos eficaz que a representada na fig. 11 f, pois a transmissão do calor no sentido normal às lâminas é dificultada pelo papel interposto entre as mesmas, sendo o papel mau condutor do calor.

A seção das travessas e das colunas laterais é em geral retangular, e às vezes, para diminuir a relutância e as perdas no ferro, são construídas com seção de 15 a 30% maior que a do núcleo.

Em alguns casos, tanto o núcleo como as travessas e colunas, são construídos com lâminas de espessura de 0,35 mm. Recorre-se a lâminas finas quando é necessário ter perdas muito baixas, pois com estas lâminas a perda no ferro é aproximadamente de 1 W/kg.

6) TIPOS DOS ENROLAMENTOS

Qualquer que seja o tipo de construção do transformador, os dois enrolamentos de alta tensão (A.T.) e baixa tensão (B.T.) da mesma fase são em geral colocados sobre a mesma coluna. Nos transformadores monofásicos de colunas, é possível dispor o enrolamento de A.T. sobre uma coluna e o enrolamento B.T. sobre outra. Este critério, porém, não é aplicado pelo fato de dar origem a dispersões magnéticas notáveis, pois uma grande parte do fluxo gerado pelo enrolamento primário se fecha no ar sem chegar a concatenar-se com o secundário. Nos transformadores industriais há várias maneiras de se disporem as bobinas a fim de se diminuir a dispersão magnética. Conforme a posição relativa em que são dispostas as bobinas A.T. e B.T., obtêm-se os dois tipos de enrolamentos que são de bobinas *concéntricas* ou *tubulares* e de *bobinas alternadas* ou de *discos*.

a) *Enrolamentos concéntricos ou tubulares*

Esta construção realiza-se dispondo-se sobre cada coluna os dois enrolamentos de alta e baixa tensão, concéntricos, separados entre si por meio de material isolante.

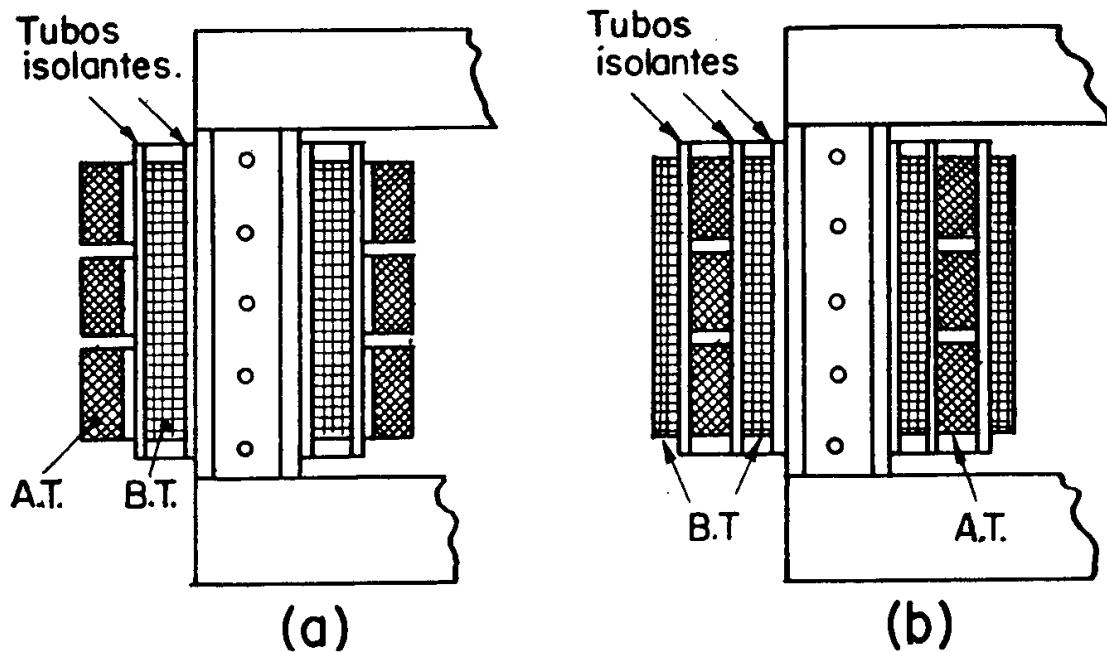


Fig. 12

Para maior segurança, perto da coluna coloca-se sempre o enrolamento B.T. separado da mesma por meio de um tubo de material isolante. Os enrolamentos adquirem a forma indicada na fig. 12 a, na qual o enrolamento A.T. é dividido em várias bobinas sobrepostas e devidamente distanciadas, enquanto o enrolamento B.T. é geralmente constituído em forma de solenóide contínuo.

As vezes, porém, o enrolamento B.T. é subdividido em dois solenóides concêntricos, dispondendo-se um destes próximo da coluna e o outro externamente ao enrolamento A.T. como é indicado na fig. 12 b. Esta disposição diminui consideravelmente a dispersão.

b) Enrolamento com bobinas alternadas ou de discos

Esta construção é realizada executando-se ambos os enrolamentos A.T. e B.T. com várias bobinas de comprimento axial pequeno (discos) e sobrepondo-se as bobinas A.T. e B.T. alternadamente como é indicado na fig. 13. Para tornar mais fácil o isolamento contra a cabeça do núcleo, as bobinas são divididas de maneira que as extremas pertençam ao enrolamento B.T. Para diminuir a dispersão, estas duas bobinas devem possuir metade da espessura das bobinas B.T. O isolamento entre as bobinas sobrepostas é obtido com a interposição de coroas isolantes. O enrolamento com bobinas a discos é particularmente usado nos transformadores de núcleo envolvente.

Os enrolamentos A.T. e B.T. requerem uma técnica de construção diferente. No A.T., o problema fundamental é o do isolamento, enquanto no B.T. surgem dificuldades de execução, quando é necessário

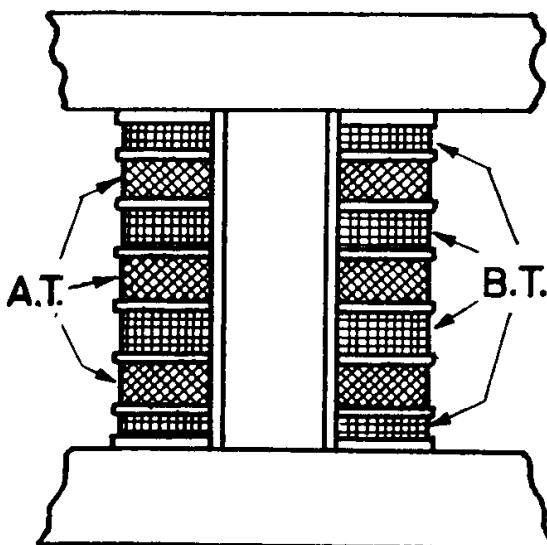


Fig. 13

empregar condutores com seção muito grande.

O enrolamento A.T. tem em geral elevado número de espiras com seção relativamente pequena, enquanto o enrolamento B.T., pelo contrário, tem poucas espiras com grande seção.

Para seções de até 10 mm^2 empregam-se fios redondos; para seções maiores empregam-se condutores com seção retangular. Estes condutores devem possuir isolamento próprio, proporcional à tensão induzida em cada espira. Para fios redondos usa-se em geral um isolamento de esmalte ou algodão em duas camadas. Para condutores

em barra usa-se algodão em duas ou três camadas, papel ou cadarço de algodão. Os condutores de seção muito grande são enrolados geralmente nus, interpondo-se entre as espiras contíguas diafragmas de papel ou prespann.

7) CONSTRUÇÃO DOS ENROLAMENTOS B.T.

Na construção dos enrolamentos concêntricos, as bobinas B.T. são feitas em geral com uma ou mais camadas uniformes. Em geral as bobinas cobrem todo o comprimento da coluna, excluído o espaço necessário ao isolamento.

A necessidade de dispor uma ou mais camadas sobrepostas, depende do número de espiras a serem enroladas.

A possibilidade de se realizar o enrolamento B.T. numa única camada apresenta-se no caso de tensões relativamente baixas e correntes muito intensas. O enrolamento reduz-se a uma simples hélice da barra de cobre que pode ser usada de pé como na fig. 14 a, ou de costas como na fig. 14 b: as espiras podem ser isoladas uma da outra com cadarço de papel ou algodão, ou por meio de diafragmas isolantes.

Se uma camada é insuficiente para conter o número de espiras desejado, constrói-se o enrolamento com duas camadas, executando-se uma primeira hélice dirigida do alto para baixo e sobrepondo-se a esta uma segunda dirigida de baixo para o alto, como indica a fig. 15. Analogamente pode-se construir o enrolamento com três camadas.

Entre a primeira espira de uma camada e a última da camada sobreposta existe a diferença de potencial igual à induzida nas espiras que compõem as duas camadas. Pela razão exposta surge a ne-

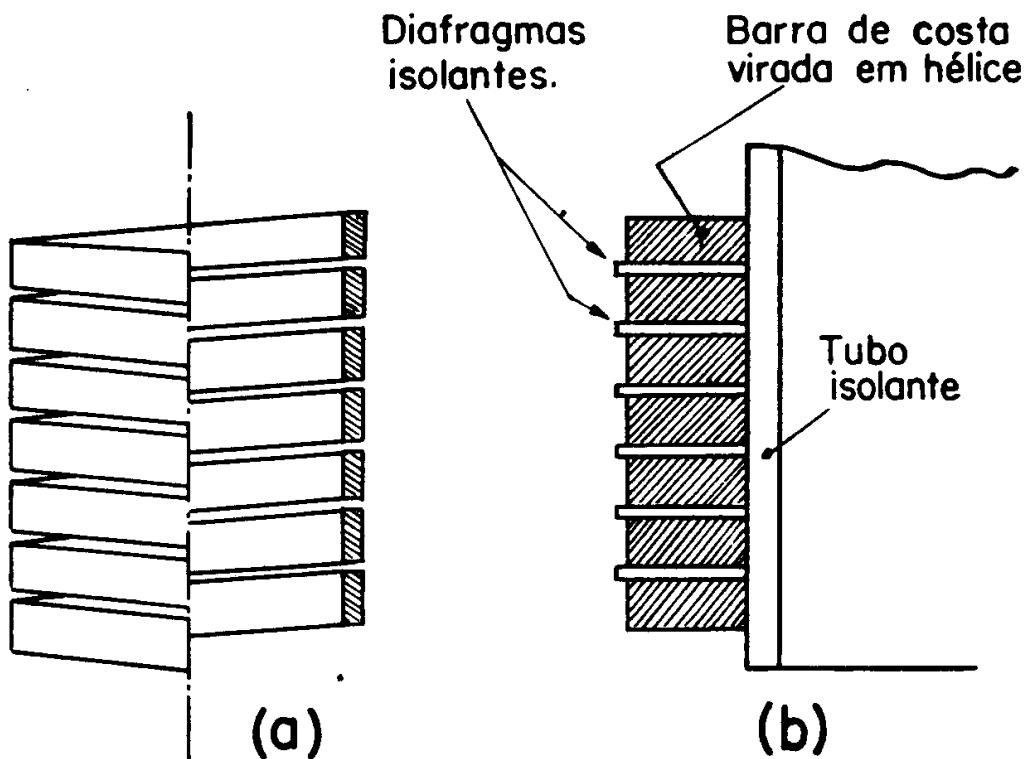


Fig. 14

cessidade de se interpor entre as camadas uma boa separação isolante, feita com papel, prespann ou tela de linha oleada cuja espessura varia entre 0,2 a 2 mm, conforme a tensão.

Em lugar do enrolamento de camadas uniformes sobrepostas pode-se usar um enrolamento B.T. dividido em bobinas parciais, sobrepostas em colunas. Cada bobina é feita por uma espiral de barra de cobre usada de pé com espiras concêntricas, como é indicado na fig. 16.

O agrupamento em série entre estas bobinas é feito por meio de tiras de cobre enroladas e soldadas alternativamente com os terminais internos e externos das bobinas sobrepostas.

Este tipo de enrolamento é especialmente usado nos transformadores encouraçados e possui a vantagem de apresentar boa dispersão

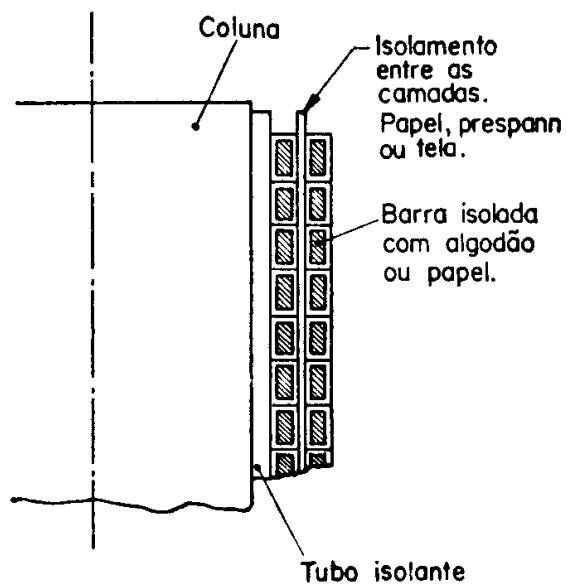


Fig. 15

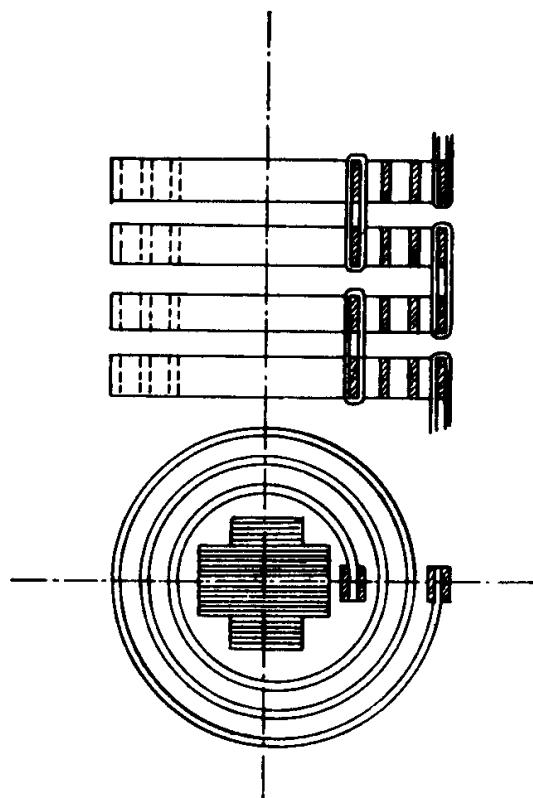


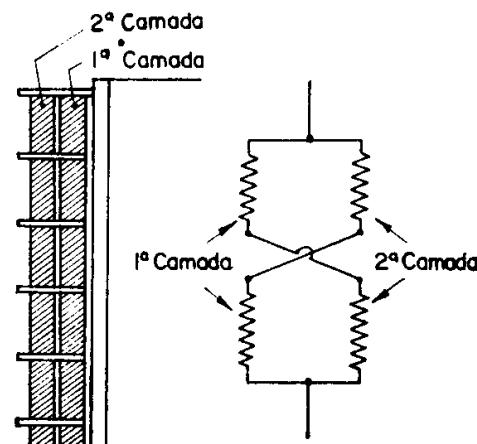
Fig. 16

do calor. Entre uma bobina e outra interpõe-se um diafragma isolante, capaz de suportar o dobro do valor da tensão de cada bobina.

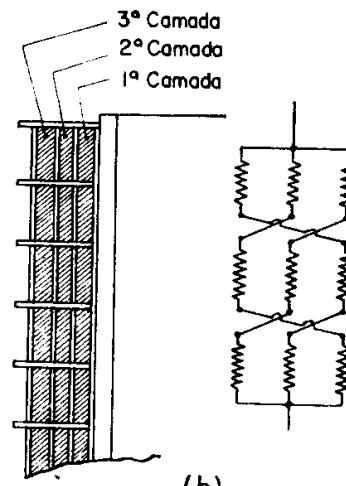
Nos enrolamentos B.T. para correntes muito intensas, que precisam de condutores com seção muito grande, para facilitar a construção dos enrolamentos, é preciso subdividir a seção necessária em dois ou três condutores distintos, que serão agrupados em paralelo. É necessário neste caso que os grupos de bobinas agrupadas em paralelo apresentem a mesma reatância, a fim de que a corrente possa subdividir-se em partes iguais.

Esta igualdade não seria realizada agrupando-se em paralelo duas camadas concêntricas, pois as espiras da camada externa apresentam

evidentemente um desenvolvimento maior que as pertencentes à camada interna. Querendo-se realizar o agrupamento em paralelo de duas camadas enroladas como na fig. 17 a, é necessário construir duas vias idênticas, agrupando-se em série entre si a metade inferior das espiras de uma camada, com a metade superior da outra, como está indicado no esquema da figura 17 a. O mesmo critério deve ser aplicado pela construção de um enrolamento com três vias internas em paralelo, que é realizada como indica a fig. 17 b: cada via com-



(a)



(b)

Fig. 17

preende o terço interno da camada inferior, o externo da camada média e o médio da camada superior. Com este artifício as três vias resultam eletricamente equivalentes e as correntes se subdividem em partes iguais.

8) CONSTRUÇÃO DOS ENROLAMENTOS A.T.

Os enrolamentos A.T. não são em geral construídos com camadas contínuas, sobrepostas, mas são subdivididos quase sempre em bobinas, pois de tal maneira fica simplificado o problema do isolamento.

Cada bobina compreende certo número de camadas, cada uma das quais possui determinado número de espiras. As camadas se contam no sentido radial e as espiras destas no sentido axial; assim sendo, a fig. 18 representa a seção de uma bobina com 5 camadas — cada uma das quais possui 7 espiras. A bobina é iniciada pelo condutor 1 e enrola-se a primeira camada do 1 até o 7, deste passa-se ao condutor 8 para se enrolar a segunda camada do 8 até o 14, procedendo-se do alto para baixo e assim sucessivamente. Se o número das camadas for ímpar, um terminal da bobina é inferior e o outro superior, como indica a fig. 18. Se o número das camadas for par, ambos os terminais são inferiores. A primeira solução é perfeita, pois simplifica a ligação das bobinas, que é feita por meio de uma chapeira de cobre como indica a fig. 18. O isolamento entre as camadas deve ser apropriado com a tensão induzida nas espiras que compõem as duas camadas adjacentes: entre a espira 1 e a 14 existe de fato uma diferença de potencial correspondente a 14 espiras. Se esta tensão for inferior a 100 volts, é suficiente somente a cobertura isolante do fio, mas se, pelo contrário, é maior que 100 volts, é preciso interpor entre as camadas diafragmas de papel ou tela de linha.

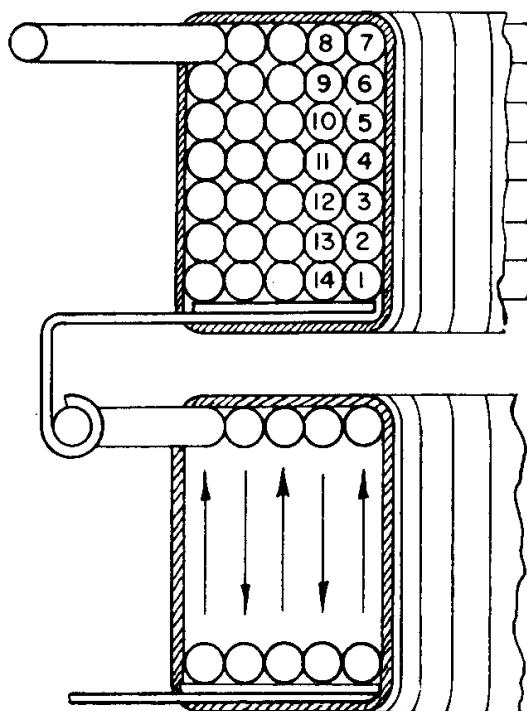


Fig. 18

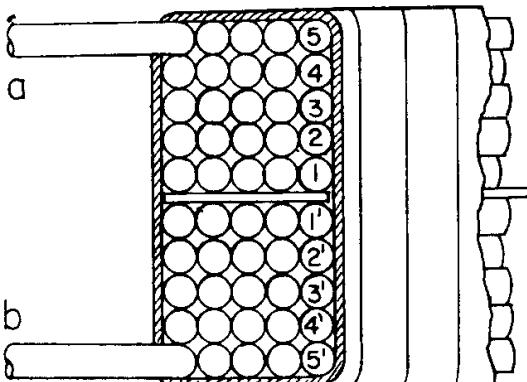


Fig. 19

A bobina simples acima indicada apresenta o inconveniente de ter sempre um terminal interno, o qual deve ser trazido para o exterior por meio de uma ligação que cruza todas as camadas e deve portanto possuir isolamento proporcional à tensão total da bobina. Para evitar este inconveniente, especialmente para bobinas com tensões elevadas, adota-se em geral a construção com bobina dupla, ilustrada na fig. 19. Esta é composta de duas bobinas em sentido contrário, isto é, uma para a direita procedendo-se pela primeira camada de baixo para cima (1 a 5) e a outra, esquerda, com a primeira camada enrolada do alto para baixo (1' a 5'). As duas bobinas são isoladas por meio de um diafragma e os extremos internos 1 e 1' são diretamente ligados entre si. Com esta disposição ficam livres o terminal superior (a) de uma bobina e o inferior (b) da outra. Estes dois terminais podem facilmente ser agrupados em série com as outras bobinas da fase.

9) RESFRIAMENTO DOS TRANSFORMADORES

Nos transformadores, a imobilidade de suas partes componentes prejudica a dispersão do calor, que resulta das perdas no cobre e no ferro.

Esta imobilidade, porém, permite o emprego de um meio refrigerante líquido, que é mais eficaz que o ar, o que é feito imergindo-se todo o transformador em uma caixa cheia de líquido apropriado.

O líquido mais conveniente e universalmente empregado é o óleo mineral, o qual, além de apresentar uma elevada capacidade térmica e um excelente coeficiente de transmissão do calor, é também um ótimo isolante, que apresenta uma rigidez dielétrica quase cinco vezes maior que o ar.

Um transformador imerso no óleo requer, portanto, uma superfície de resfriamento menor do que a que seria necessária, se o meio refrigerante fosse o ar. O poder isolante do óleo permite reduzir consideravelmente o volume do transformador.

Para que o óleo possa cumprir sua tarefa de isolante, deve ser isento de umidade e deve poder penetrar facilmente entre as bobinas a fim de impregnar os separadores.

Por esta razão, usam-se como separadores algodão, papel e prespann e excluem-se, pelo contrário, borracha e derivados.

Nas Américas é em geral seguido o critério de se usar o óleo exclusivamente como meio refrigerante sem se considerar o seu poder isolante: o transformador deve ser em tal caso isolado como se tivesse que funcionar livremente no ar, e o óleo não precisa possuir especiais propriedades isolantes.

As perdas que devem ser dissipadas sob a forma de calor são, uma percentagem muito pequena da potência do transformador, pois o rendimento dos transformadores pode alcançar e mesmo exceder 99%. Assim

mesmo o valor absoluto dessas perdas pode ser elevado nos transformadores de grande potência. Por exemplo, num transformador de 10 000 kVA, precisa-se dissipar uma potência de 100 kW em forma de calor, sem que a temperatura dos enrolamentos supere 75°C. É compreensível, portanto, que as dificuldades de resfriamento aumentem com o aumentar da potência.

Nos transformadores normais, com potência até 20 kVA e tensão até 6 000 volts, o resfriamento é feito com ar. Estes transformadores são chamados de transformadores secos.

Constroem-se, pelo contrário, transformadores imersos em óleo para potências e tensões maiores que os valores indicados. Em casos especiais constroem-se transformadores secos também para potências muito elevadas, aplicando-se neste caso a ventilação artificial.

Dando-se ao óleo a tarefa do resfriamento do transformador, é necessário evidentemente que o óleo possa resfriar-se, dissipando o calor que subtraiu ao transformador.

Distinguem-se a este respeito os transformadores em óleo com resfriamento natural e com resfriamento artificial.

O resfriamento natural do óleo obtém-se construindo-se a caixa que contém o transformador com uma extensão suficiente para transmitir ao ar a quantidade de calor correspondente às perdas do transformador, sem que o óleo interno supere a temperatura de 75°C. A superfície necessária consegue-se construindo-se a caixa com lâminas de ferro providas de amplas ondulações, ou construindo-se a caixa lisa para se adaptar sobre esta oportunos radiadores ou tubos.

Em todos os casos a caixa possui dimensões muito maiores que as do transformador nelas contido; de maneira que ao redor do transformador se formam colunas ascendentes de óleo quente que, lambendo as paredes da caixa, se resfria.

Os espaços compreendidos entre os enrolamentos e o núcleo devem, portanto, ser proporcionados com o intuito de formar vários canais verticais, entre os quais a circulação ascendente de óleo possa verificar-se livremente.

Os transformadores com resfriamento artificial podem ser realizados de duas maneiras: 1.º) Deixando-se passar no óleo um tubo percorrido por água fria — neste caso as junções devem ser perfeitas para se evitarem, da maneira mais absoluta, infiltrações de água no óleo; 2.º) Colocando-se externamente à caixa do transformador uma bomba que retire o óleo quente do mesmo, lançando-o num tubo em forma de hélice imerso em água fria. A pressão do óleo neste tubo deve ser tal que lhe permita voltar ao transformador uma vez resfriado. Neste caso, tendo o óleo no tubo certa pressão, verificando-se uma infiltração, será o óleo que penetra na água, o que não constitui perigo imediato para o transformador.

10) PERDAS NO FERRO

As perdas no ferro são produzidas pelas correntes parasitas e pela histerese magnética.

Perdas por correntes parasitas — Conforme o parágrafo 162 do livro *Eletrotécnica*, numa massa metálica sujeita à variação de fluxo, geram-se f.e.m. que produzem, dentro da própria massa metálica condutora, correntes muito intensas, chamadas correntes parasitas.

Estas correntes produzem uma força magneto-motriz que pela lei de Lenz se opõe à causa que a produz, isto é, ao fluxo. Assim sendo, o efeito destas correntes constitui uma perda de potência. A fim de se reduzir esta perda de potência é necessário construir-se o núcleo com lâminas de ferro isoladas entre si (livro *Eletrotécnica*, parágrafo 120). Com esta construção, o valor da f.e.m. produzida em cada lâmina é pequeno e atua sobre um circuito elétrico de pequena seção, o que reduz consideravelmente o valor das correntes parasitas e a correspondente perda de potência.

A perda de potência produzida pelas correntes parasitas é expressa em watts pela seguinte equação:

$$W_p = 10^{-12} \frac{\pi^2}{8\rho} \cdot B_M^2 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \cdot 1 \cdot S$$

onde:

ρ é a resistividade do material das lâminas em micro-ohms-centímetro;

B_M é o valor máximo da indução nas lâminas;

f é a freqüência da variação do fluxo;

δ é a espessura em mm das lâminas;

(1.S) é o volume em cm^3 das lâminas.

Esta expressão resulta simplificada quando a perda é referida a 1 kg de lâminas, pois a mesma se transforma em:

$$\omega_p = p_p \left(\rho \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

onde:

p_p é um coeficiente que depende do material, cujos valores estão indicados na tabela da fig. 20. A fórmula acima escrita fornece a perda específica em watts por quilo (W/kg) das lâminas.

Perdas por histerese magnética — No livro *Eletrotécnica*, parágrafo 162, foi observado que qualquer núcleo magnético sujeito a magnetizar-se percorre um ciclo de histerese todas as vezes que o campo magnetizante varia de $+ B_M$ a $- B_M$ e deste novamente para $+ B_M$, sendo a potência perdida proporcional à superfície do ciclo. Esta perda foi interpretada como sendo necessária para vencer os atritos entre os magnetos elementares de que o núcleo se compõe, e foi chamada de *perda por histerese magnética*. Sua compensação é feita por meio de uma energia equivalente, absorvida da linha de alimentação.

A potência em watts perdida por efeito da histerese pode ser calculada pela fórmula de Steinmetz:

$$W_h = 10^{-7} \cdot \mu B_M^{1,6} f V$$

onde B_M representa o valor máximo da indução à qual o núcleo é solicitado; f a freqüência de variação do fluxo, expressa em ciclos por segundo ($f = \frac{n.p}{60}$); V é o volume do material expresso em centímetros cúbicos; μ é o coeficiente de Steinmetz que depende da natureza do material.

A fórmula acima simplifica-se quando referida a 1 kg de lâminas pois transforma-se em:

$$\omega_h = p_h \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^{1,6}$$

para $B_M < 10\,000$

$$\omega_h = p_h \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

para $B_M > 10\,000$

Esta fórmula fornece a perda específica de potência por histerese em watts por quilo (W/kg) de lâminas.

A fórmula de Steinmetz é empírica e o expoente 1,6 reproduz o fenômeno com suficiente aproximação somente pelos valores de B_M inferiores a 10 000 gauss. Para valores de B_M superiores a 10 000 gauss o valor do expoente aproxima-se de 2.

O coeficiente p_h depende do material e seu valor está indicado na tabela da fig. 20.

Perdas específicas totais no ferro — A perda específica total no ferro é dada pela soma das perdas por correntes parasitas e as de histerese magnética, podendo ser expressa pela fórmula seguinte:

$$\omega f_e = \omega_p + \omega_h = p_p \left(\delta \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{B_M}{10\,000} \right)^2 + p_h \cdot \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

A tabela da fig. 20 indica os coeficientes p_p e p_h e as perdas específicas totais (W/kg_{10}) por vários tipos de lâminas para a freqüência $f = 50$ Hz, para a indução $B_M = 10\,000$ gauss e a espessura $\delta = 0,5$ mm.

Na equação antes escrita, pondo em evidência

$$\begin{aligned} \text{o fator } \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 \text{ obtém-se} \\ \omega f_e = \left[p_p \left(\delta \frac{f}{50} \right)^2 + p_h \frac{f}{50} \right] \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 \end{aligned}$$

Se a freqüência for constante, por exemplo $f = 50$, substituindo os valores de p_p e p_h da tabela da fig. 20, por exemplo das lâminas normais, com espessura $\delta = 0,5$ mm, obtém-se

$$\begin{aligned} \omega f_e &= \left[4,8 \left(0,5 \frac{50}{50} \right)^2 + 2,4 \frac{50}{50} \right] \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 = \\ &= (4,8 \cdot 0,25 + 2,4) \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 = 3,6 \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 \end{aligned}$$

pondendo $B_M = 10\,000$ resulta $\omega f_e = 3,6 \text{ W/kg}$.

O valor 3,6 representa, portanto, a perda específica em W/kg que se verifica nas lâminas de ferro normal com espessura $\delta = 0,5$ mm, quando sujeitas a um campo magnético alternado com $B_M = 10\,000$ e $f = 50$. Este valor é o representado na tabela da fig. 20 (W/kg_{10}).

Qualidade das lâminas	W/kg_{10} por $f = 50$; $\delta = 0,5$ e $B_M = 10\,000$	P_p	P_h
Lâminas normais	3,6	4,8	2,4
Lâminas com pouco silício	3,0	2,6	2,3
Lâminas com silício	1,7	1,1	1,4

Fig. 20

Do exposto resulta que para freqüência constante $f = 50$ e indução variável, a perda específica, nas lâminas de ferro com espessura $\delta = 0,5$ mm, para os diferentes valores da indução, pode ser calculada usando a seguinte fórmula:

$$\omega f_e = W/kg_{10} \left(\frac{B_M}{10\ 000} \right)^2$$

Os valores de W/kg_{10} para os diferentes tipos de lâminas, com $\delta = 0,5$ mm, estão indicados na tabela da fig. 20.

Conhecendo-se o peso do ferro em kg a perda no núcleo é fornecida por:

$$W_{Fe} = \omega f_e \cdot kg$$

Para lâminas com espessura diferente de 0,5 mm, para valores da freqüência diferentes de 50 Hz e para valores da indução diferentes de 10 000, as perdas específicas são calculadas pela fórmula geral

$$\omega f_e = \left[P_p \left(\delta \frac{f}{50} \right)^2 + P_h \frac{f}{50} \right] \left(\frac{B_M}{10\ 000} \right)^2$$

na qual são empregados os valores da tabela da fig. 20.

Nas lâminas dos pequenos transformadores que sofrem processo de usinagem apreciáveis, tais como os de corte e perfuração por meio de prensas, as perdas específicas são maiores que as calculadas pela fórmula acima mencionada. Assim sendo, o valor das perdas específicas deverá ser aumentado de 15%, resultando

$$W_{Fe} = 1,15 \cdot \omega f_e \cdot kg$$

Em geral os fabricantes de lâminas destinadas às máquinas elétricas e aos transformadores, fornecem curvas que representam as grandezas características das mesmas, inclusive as perdas específicas. As perdas específicas são referidas à freqüência de 50 ou 60 Hz, podendo, entretanto, ser convertidas para outro valor da freqüência, empregando as fórmulas antes escritas.

No Brasil, a fábrica mais importante de chapas para transformadores é a Cia. Aços Especiais Itabira (ACESITA).

As chapas produzidas pela Acesita, destinadas a transformadores, têm a espessura de 0,35 mm. Todos os gráficos das perdas, magnetização e permeabilidade, podem ser obtidos pelos interessados. Neste livro, a título de orientação estão indicados unicamente os valores típicos das chapas de fabricação nacional, que atendem às normas alemãs DIN 36 400.

Pelo fato de as chapas de fabricação nacional atenderem às normas DIN, têm espessura em mm, os valores são referidos à freqüência de 50 Hz, as perdas específicas são expressas em W/kg e as f.m.m. são expressas em Ampère-espiras por centímetro.

A fig. 21 indica as características das chapas fabricadas pela Acesita.

CHAPA PARA TRANSFORMADORES — ACESITA; Esp = 0,35 mm; F = 50 Hz.

Tipo	ω_{10}	ω_{15}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}
	W/kg	W/kg	gauss	gauss	gauss	gauss
Acesita 170 - 35	1,51 a 1,70	4,0 a 4,2	14 300	15 500	16 500	18 500
Acesita 160 - 35	1,46 a 1,60	3,6 a 4,0	14 300	15 500	16 500	18 500
Acesita 145 - 35	1,28 a 1,45	3,2 a 3,6	14 300	15 500	16 500	18 500
Acesita 127 - 35	1,16 a 1,27	2,8 a 3,2	14 300	15 500	16 500	18 500
Acesita 115 - 35	1,04 a 1,15	2,5 a 2,8	14 300	15 500	16 500	18 500
Acesita 100 - 35	inf. a 1,03	inf. a 2,5	14 300	15 500	16 500	18 500

Para obter-se as perdas específicas relativas à freqüência de 60 Hz, é suficiente multiplicar os valores da tabela por 1,25.

Fig. 21

Na fig. 21, ω_{10} e ω_{15} representam as perdas em W/kg por uma indução de 10 000 gauss e 15 000 gauss respectivamente e uma freqüência de 50 Hz; B_{25} , B_{50} , B_{100} e B_{300} representam a indução magnética em gauss para uma f.m.m. de 25, 50, 100 e 300 Ampère-espiras por centímetro respectivamente. Estes últimos valores são muito aproximados dos contidos na tabela da fig. 156 e no gráfico da fig. 157 do livro *Eletrotécnica*.

Entre os fabricantes estrangeiros foi escolhida a firma ARMCO STEEL CORPORATION, cujas chapas são fabricadas atendendo às normas americanas. Assim sendo, as perdas específicas das mesmas são expressas em Watts/pound, as espessuras em polegadas e a freqüência de referimento é 60 Hz. ABNT 05-35-0,55.

As chapas de produção normal da Armco são as de bitola 24, 26 e 29, cujas espessuras estão indicadas em polegadas e milímetros na tabela da fig. 22.

ESPESSURA DAS CHAPAS ARMCO

Bitola n. ^o	ESPESSURA	
	Polegadas	Milímetros
24	0,0250	0,635
26	0,0185	0,470
29	0,0140	0,356

Fig. 22

TIPOS DE CHAPAS

Transformadores de distribuição	M 14 e M 15
Transformadores de audio	A 6 e M 15
Transformadores de televisão	M 19; M 22 e M 27
Transf. para alimentação de rádio	M 22; M 27 e M 36
Reguladores de tensão	M 22 e M 27
Bobinas de reatância	M 22; M 36 e M 45

Fig. 23

As aplicações dos vários tipos de chapas Armco estão indicadas na tabela da fig. 23. As perdas específicas em W/kg e Watts/pound estão indicadas na tabela da fig. 24.

Para se obterem as perdas específicas relativas à freqüência de 50 Hz. é suficiente multiplicar os valores indicados na tabela da fig. 24 pelo fator 0,79.

Assim, por exemplo, as lâminas M 27 — Bitola 29 com $B_M = 10\,000$ gauss, com a freqüência de 50 Hz. apresenta a perda específica de $1,78 \times 0,79 = 1,41$ W/kg.

PERDAS ESPECÍFICAS DAS LÂMINAS ARMCO; F = 60 Hz

Tipo	BM = 10000						BM = 15000					
	Bitola 29 Esp = 0,014" Esp = 0,356 mm			Bitola 26 Esp = 0,0185" Esp = 0,470 mm			Bitola 24 Esp = 0,025" Esp = 0,635 mm			Bitola 29 Esp = 0,014" Esp = 0,356 mm		
	W/p	W/kg	W/p	W/kg	W/p	W/kg	W/p	W/kg	W/p	W/kg	W/p	W/kg
M 14	0,52	1,14	—	—	—	—	1,30	2,85	—	—	—	—
M 15	0,58	1,27	0,68	1,5	—	—	1,45	3,18	1,70	3,74	—	—
M 19	0,67	1,47	0,76	1,67	0,91	2,00	1,64	3,60	1,86	4,10	2,10	4,60
M 22	0,73	1,60	0,83	1,83	0,98	2,16	1,77	3,90	1,97	4,33	2,23	4,90
M 27	0,81	1,78	0,93	2,04	1,10	2,42	1,92	4,22	2,14	4,70	2,45	5,40
M 36	0,92	2,02	1,06	2,34	1,24	2,72	2,15	4,72	2,38	5,22	2,84	6,25
M 43	—	—	—	—	1,45	3,18	—	—	—	—	3,35	7,36
M 45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,20	9,20

Fig. 24

11) CORRENTE A VAZIO OU DE EXCITAÇÃO E SUA FORMA

Ilustrando o princípio de funcionamento do transformador ideal (parágrafo 3), além de considerar nulas as resistências ôhmicas dos enrolamentos e as dispersões magnéticas, foram supostas nulas também as perdas por histerese e correntes parasitas no núcleo.

Com esta hipótese no funcionamento a vazio, o transformador não absorve nenhuma potência mas simplesmente uma determinada corrente magnetizante I_μ , totalmente “dewatada”, destinada a produzir o fluxo no núcleo.

No transformador, entretanto, devem-se considerar outros fatores, isto é, no funcionamento a vazio, o primário comporta-se identicamente a um circuito de corrente alternada enrolado sobre um núcleo magnético. (Livro *Eletrotécnica*, parágrafo 162).

O fluxo alternado, no núcleo, determina uma perda devida aos fenômenos de histerese, correntes parasitas e saturação magnética do ferro. A corrente necessária a produzir um fluxo alternado senoidal não pode ser senoidal, mas forçosamente deformada, por uma terceira harmônica. A fim de simplificar os cálculos práticos, a corrente magnetizante será considerada senoidal e, portanto, pode ser representada por meio de um vetor I_μ em fase com o vetor Φ que representa o fluxo, como indica a fig. 25.

Para compensar a perda no ferro, o enrolamento primário deverá absorver da linha de alimentação, além da corrente magnetizante I_μ , que é totalmente “dewatada” também uma corrente elétrica I_a em fase com a tensão.

A corrente a vazio I_o do transformador resulta da composição da corrente magnetizante I_μ e da corrente ativa I_a que deve compensar as perdas no ferro. Esta corrente I_o constitui a corrente a vazio do transformador e resulta defasada em atraso sobre a tensão do ângulo φ , o qual é tanto maior quanto menor for a componente I_a , isto é, quanto menores forem as perdas no ferro.

A corrente I_o é chamada também de corrente de excitação.

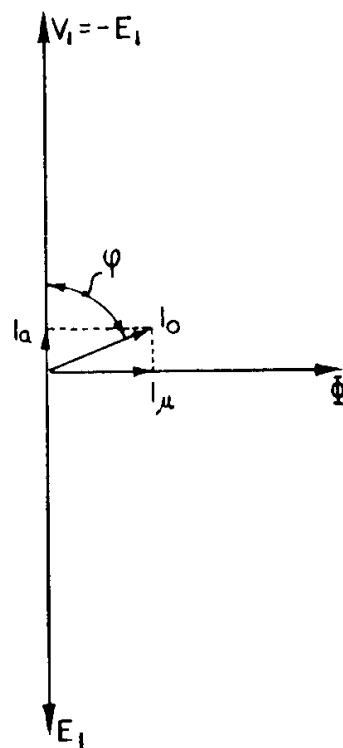


Fig. 25

12) CALCULO DA CORRENTE A VAZIO DO TRANSFORMADOR

Para calcular a corrente a vazio I_o do transformador é necessário antes calcular as duas componentes, isto é, ativa I_a e reativa I_μ .

a) Cálculo da corrente ativa I_a

Para se determinar a corrente ativa I_a , é necessário conhecer a perda de potência no ferro, o que se faz com base no esquema de cálculo indicado no parágrafo 10.

É preciso observar que alguns fabricantes, a fim de diminuir o perímetro das bobinas, fazem a seção das colunas do transformador menor que a seção das travessas; assim sendo, a indução magnética B_M nas colunas resulta maior que nas travessas e, portanto, é necessário executar um cálculo distinto para as colunas e para as travessas.

O valor da indução máxima B_M é calculado tomando-se por base a tensão de alimentação V_1 do enrolamento primário e o correspondente número das espiras N_1 .

Como é sabido, no enrolamento primário deve gerar-se uma f.e.m. E_1 que deve equilibrar a tensão aplicada V_1 ; sendo Φ_M o valor máximo do fluxo no núcleo, o valor eficaz da f.e.m. E_1 é dado por:

$$E_1 = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_M \cdot N_1$$

Pondo então $E_1 = V_1$, obtém-se

$$\Phi_M = 10^8 \frac{V_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1}$$

Na realidade, em virtude das quedas de tensão a f.e.m. E_1 é um pouco inferior a V_1 . No funcionamento a vazio porém estas quedas são muito pequenas e podem ser desprezadas.

Obtido o valor do fluxo no núcleo, se este é constituído por colunas, cuja seção é S_c e com travessas cuja seção é S_t , podem-se calcular os valores da indução máxima correspondente, pois nas colunas

$$B_{Mc} = \frac{\Phi_M}{S_c} \quad \text{e nas travessas } B_{Mt} = \frac{\Phi_M}{S_t}.$$

Com os valores assim obtidos, calculam-se as perdas em W/kg relativas às colunas e às travessas. Multiplicando-se estes valores pelos pesos das colunas e das travessas obtém-se as perdas totais. (É necessário lembrar que no cálculo das seções das colunas e das travessas, é preciso diminuir

as seções aparentes de 10% a 12%, para se considerar a seção ocupada pelo isolante.)

As perdas assim calculadas devem ser enfim aumentadas de 15% para se ter em consideração as perdas adicionais.

Considerando-se que no funcionamento do transformador a vazio a corrente absorvida é muito pequena e a correspondente perda por efeito Joule é, portanto, desprezível, resulta que as perdas no ferro assim determinadas representam a potência W_o que o transformador absorve no funcionamento a vazio. Esta é a potência indicada por um wattímetro inserido na linha de alimentação do transformador quando o secundário está aberto; chama-se, portanto, perda a vazio do transformador.

Conseqüentemente, se o transformador funciona a vazio com uma tensão de alimentação V_1 , deve absorver, para compensar as perdas,

W_o uma corrente ativa I_a definida por $W_o = V_1 I_a$, de onde $I_a = \frac{W_o}{V_1}$.

As considerações expostas referem-se a um transformador monofásico.

b) Cálculo da corrente magnetizante

O cálculo da corrente magnetizante consiste em determinar o número das Ampère-espiras necessárias a produzir no núcleo o fluxo necessário. O cálculo é feito com base no fluxo máximo Φ_M e, portanto, no valor máximo $I_{\mu M}$ da corrente magnetizante.

Neste cálculo é necessário distinguir os diferentes trechos que compõem o núcleo e ter em consideração os entreferros representados pelas juntas. Cada junta bem acabada é equivalente a um entreferro com espessura de 0,03 ou 0,05 cm quando se trata, respectivamente, de juntas encastadas ou frontais.

Para um núcleo monofásico envolvido com duas colunas e duas travessas com quatro juntas, o número das Ampère-espiras máximas A_{eM} resulta da soma:

$$A_{eM} = 2(A_{ec})_1 \cdot h + 2(A_{ec})_2 \cdot g + 4 \cdot 0,8 B_{Me} I_e, \text{ sendo:}$$

$(A_{ec})_1$ = número de Ampère-espiras por centímetro relativo às colunas, obtido por meio das tabelas em correspondência da indução

$$B_{Me} = \frac{\Phi_M}{S_c}$$

h = altura de uma coluna em centímetros.

$(A_{ec})_2$ = número de Ampère-espiras por centímetro relativo às travessas,

$$\text{em correspondência da indução } B_{Mt} = \frac{\Phi_M}{S_t}$$

g = comprimento de uma travessa em centímetros.

le = espessura em centímetros do entreferro correspondente a cada junta.

B_{Mc} = indução máxima na junta, igual à das colunas.

Pondo então: $A_{eM} = N_1 I_{\mu M}$, o valor máximo da corrente magnetizante resulta

$$I_{\mu M} = \frac{A_{eM}}{N_1}$$

Para obter-se o valor eficaz desta corrente, embora a forte deformação que esta apresenta, deve-se usar pelos cálculos práticos a fórmula:

$$I_{\mu} = \frac{I_{\mu M}}{\sqrt{2}} = \frac{A_{eM}}{\sqrt{2 \cdot N_1}}$$

c) *Corrente total a vazio e fator de potência a vazio*

Obtidas as duas componentes ativa I_a e magnetizante I_{μ} , fica também definida a corrente a vazio I_o do transformador, com base no diagrama da fig. 26, de onde resulta $I_o = \sqrt{I_a^2 + I_{\mu}^2}$

O ângulo de defasagem ϕ_o desta corrente com respeito à tensão V_1 fica determinado pela relação $\operatorname{tg} \phi_o = \frac{I_{\mu}}{I_a}$.

O co-seno deste ângulo constitui o fator de potência a vazio ($\cos \phi_o$), do transformador: este fica também definido diretamente pela expressão da potência a vazio.

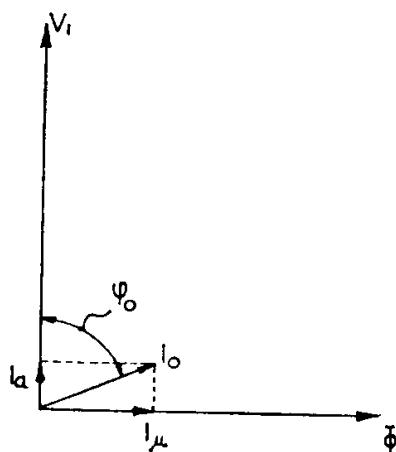


Fig. 26

$$W_o = V_1 I_o \cos \phi_o$$

$$\text{de onde } \cos \phi_o = \frac{W_o}{V_1 I_o}$$

O fator de potência a vazio é sempre muito baixo, cerca de 0,1. O valor da corrente a vazio I_o é compreendido em geral entre 6% e 1% da corrente primária de plena carga.

13) AS CORRENTES A VAZIO NOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Nos transformadores trifásicos, as correntes a vazio são diferentes nas várias fases, pois os comprimentos do circuito magnético das mesmas são diferentes uns dos outros.

Imagina-se por exemplo um transformador de núcleo envolvido com as fases agrupadas em estrela, como indica a fig. 27 a. Cada fase possui um circuito elétrico independente e consequentemente as correntes das três fases não são sujeitas a nenhum vínculo entre si. A resultante destas três correntes constitui a corrente do fio neutro que fica então livre de adquirir qualquer forma e valor. Em tal caso, se as tensões aplicadas nas fases formam um sistema simétrico e são senoidais, as f.e.m. que devem equilibrá-las também o serão, e portanto, os fluxos serão senoidais, iguais e defasados de 120° . Sendo o circuito magnético dissimétrico com respeito às três fases, devendo ser iguais os fluxos, serão diferentes as correntes magnetizantes necessárias a produzi-los. Cada uma das fases externas possui dois circuitos magnéticos paralelos, com comprimento $(2h + 4g)$ e $2h + 2g$) e a fase central possui dois circuitos magnéticos, com comprimento $2h + 2g$. A corrente nas duas fases externas resultará, portanto, maior do que a relativa à fase central e precisamente

$$I'_{\mu M} = \frac{(Aec)_1 \cdot h + 2(Aec)_2 \cdot g + 2 \cdot 0,8 \cdot B_{Me} \cdot l_e}{N_1}$$

e pela fase central ter-se-á

$$I''_{\mu M} = \frac{(Aec)_1 \cdot h + 2 \cdot 0,8 \cdot B_{Me} \cdot l_e}{N_1}$$

Tomando-se em consideração a deformação das correntes magnetizantes produzidas pela saturação do ferro, resulta que os fluxos nas três colunas e as respectivas correntes magnetizantes podem ser representados conforme o diagrama indicado na fig. 27 b. Os três fluxos possuem o mesmo valor máximo e são senoidais com uma defasagem recíproca de 120° .

As correntes magnetizantes correspondentes são maiores pelas duas fases externas que pela central.

Querendo-se considerar estas correntes ainda senoidais e representá-las com vetores, é possível compô-las e achar a corrente I_1^0 que passa no fio neutro. Esta corrente como pode-se ver é de amplitude pequena; sendo porém composta por correntes deformadas por terceira harmônica, será também deformada. A onda deformante de terceiro grau é de amplitude elevada e pode perturbar as instalações telefônicas próximas da linha de alimentação do transformador.

Para obter a componente ativa I_a necessária a compensar as perdas no ferro, segue-se o critério aproximado de calcular a perda no ferro W_o do núcleo inteiro (colunas e travessas) pondo então $W_o = \sqrt{3} V_1 I_a$, sendo V_1 o valor eficaz da tensão de linha primária.

O cálculo preciso das correntes a vazio não tem praticamente grande importância, pois no funcionamento com carga do transformador as correntes magnetizantes são desprezíveis com respeito às correntes úteis que participam da transformação.

No ensaio a vazio dos transformadores trifásicos a potência W_o é medida geralmente com o método dos dois wattímetros e as correntes a vazio com três amperímetros (pois os três circuitos são desequilibrados).

O fator de potência a vazio do transformador resulta:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot \frac{I_o' + I_o'' + I_o'''}{3}}$$

sendo I_o' , I_o'' e I_o''' as correntes indicadas nos amperímetros.

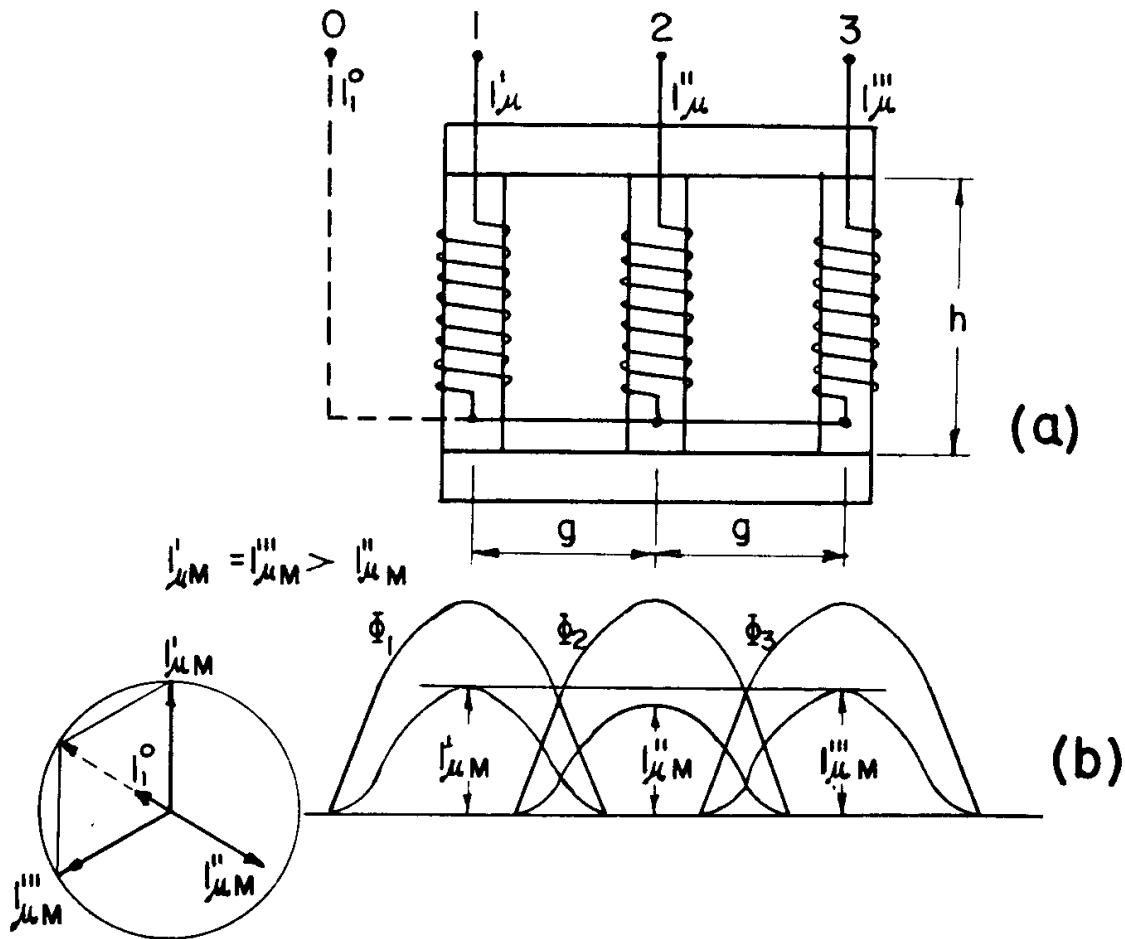


Fig. 27

14) RESISTÊNCIAS ÔHMICAS E INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO DOS ENROLAMENTOS

a) Resistências ôhmicas

Os enrolamentos primários e secundários do transformador apresentam inevitavelmente uma determinada resistência elétrica.

Estas resistências são chamadas brevemente de resistência primária e secundária do transformador e são normalmente indicadas, em cada fase, com R_1 e R_2 . Estas exercem sobre o funcionamento do transformador um duplo efeito. Em primeiro lugar, determinam uma queda de tensão chamada queda ôhmica primária e secundária; em segundo lugar, produzem uma perda de energia por efeito Joule, cuja potência constitui a perda no cobre primário e secundário do transformador. Para conter esta perda em limites convenientes é necessário tornar suficientemente pequenas as resistências primárias e secundárias, escolhendo-se oportunamente a seção dos condutores do enrolamento.

O enrolamento A.T. que possui um número maior de espiras com menor seção, apresenta sempre uma resistência maior que a do enrolamento B.T. As resistências são, em geral, proporcionadas de maneira que, no funcionamento com carga normal, as perdas nos dois enrolamentos resultam sensivelmente iguais entre si, isto é:

$$R_1 I_1^2 = \sim R_2 I_2^2$$

verifica-se portanto

$$\frac{R_1}{R_2} = \sim \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2$$

Esta condição é realizada fixando-se nos dois enrolamentos A.T. e B.T. a mesma densidade de corrente e construindo-se os enrolamentos com condutores cuja seção é proporcional às respectivas correntes.

b) Reatâncias de dispersão primária e secundária

Falando-se do transformador ideal, foi suposto que todo o fluxo que interessa à máquina fique canalizado no núcleo, concatenando-se, portanto, totalmente, em ambos os enrolamentos. Na realidade existe certo fluxo disperso, o qual se fecha no ar ao redor do enrolamento.

Considerando-se, por exemplo, um transformador monofásico com o primário enrolado sobre uma coluna e o secundário sobre a outra, pode-se analisar a distribuição do fluxo indicado na fig. 28. O fluxo principal Φ fica efetivamente canalizado no núcleo e, portanto, concatena-se com ambos os enrolamentos primário e secundário. Quando

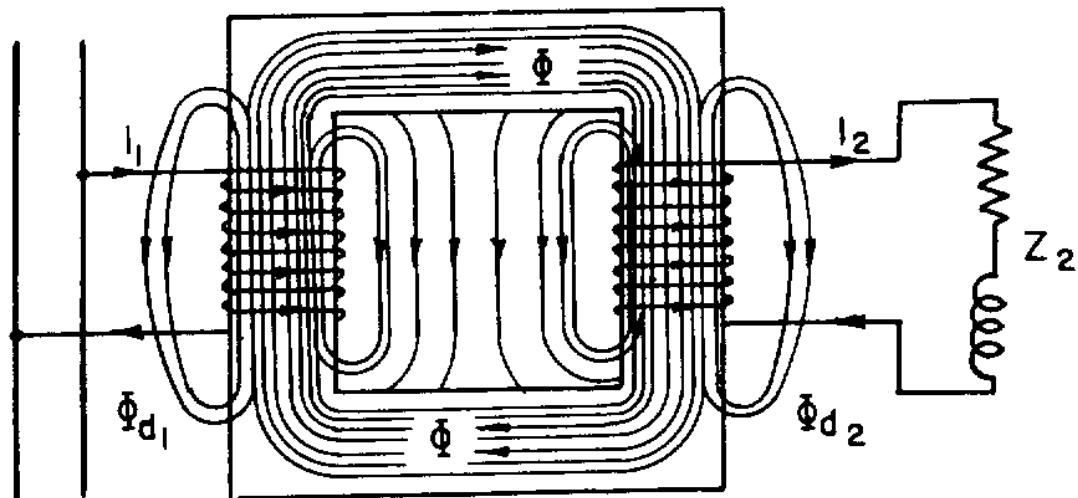


Fig. 28

o transformador funciona a vazio, este fluxo é produzido pela corrente magnetizante I_μ pela conhecida relação:

$$N_1 I_\mu = \Phi R$$

Quando, pelo contrário, o transformador funciona com carga, o fluxo Φ é produzido pela f.m.m. primária e secundária com base na equação

$$\overline{N_1 I_1} + \overline{N_2 I_2} = \overline{\Phi R}$$

Este fluxo é o verdadeiro fluxo útil do transformador, isto é, o que determina a transferência da energia do primário ao secundário.

O circuito primário é, porém, contornado por um fluxo Φ_{d1} representado pelas linhas de força que saem do núcleo lateralmente e fecham-se no ar sem concatenar-se com o enrolamento secundário. Este fluxo constitui o fluxo disperso primário.

Como o fluxo disperso se desenvolve no ar, não está sujeito aos fenômenos de saturação, e mantém-se quase proporcional à corrente I_1 que o produz. Indicando-se, portanto, com L' um coeficiente de proporcionalidade pode-se escrever

$$\Phi_{d1} = L' I_1$$

O coeficiente L' assim definido constitui a indutância de dispersão primária, medida em henry e a esta corresponde a reatância de dispersão primária, medida em ohm, fornecida por:

$$X' = \omega L'$$

Considerando-se o enrolamento secundário, observam-se os fatos seguintes:

Enquanto o transformador trabalha a vazio, o enrolamento secundário não é percorrido por nenhuma corrente e, portanto, não gera nenhum fluxo: em tais condições o enrolamento secundário é atravessado unicamente pelo fluxo Φ , produzido pela corrente magnetizante do enrolamento primário.

Quando, pelo contrário, o enrolamento secundário alimenta um circuito utilizador, este é atravessado por uma corrente I_2 . Esta corrente faz agir sobre o núcleo uma f.m.m. $N_2 I_2$ a qual é equilibrada por uma f.m.m. igual e oposta $N_1 I_1'$, devida à corrente primária de reação I' . Nestas condições o fluxo principal no núcleo fica inalterado. A corrente secundária produz também um fluxo Φ_{d2} , o qual se fecha diretamente no ar ao redor do enrolamento secundário sem interessar o primário: este fluxo constitui o fluxo disperso secundário, o qual é proporcional à corrente I_2 que o produz. Indicando-se com L'' um coeficiente de proporcionalidade pode-se escrever:

$$\Phi_{d2} = L'' I_2$$

O coeficiente L'' assim definido constitui a indutância de dispersão secundária, à qual corresponde, como no enrolamento primário, a reatância de dispersão

$$X'' = \omega L''$$

Os valores das duas reatâncias de dispersão X' e X'' , por uma dada freqüência, dependem dos fluxos de dispersão e, portanto, dependem do tipo e da posição recíproca dos enrolamentos.

Evidentemente os fluxos dispersos resultarão tanto maiores quanto mais longe entre si estão os dois enrolamentos do transformador: a disposição sobre colunas distintas, como indica a fig. 28, é, portanto, a que produz mais dispersões e por tal razão é raramente utilizada.

Nos enrolamentos concêntricos ou tubulares, fig. 29, a bobina 1 (B.T.) encontra-se ao redor do núcleo e a 2 (A.T.) encontra-se ao redor da primeira.

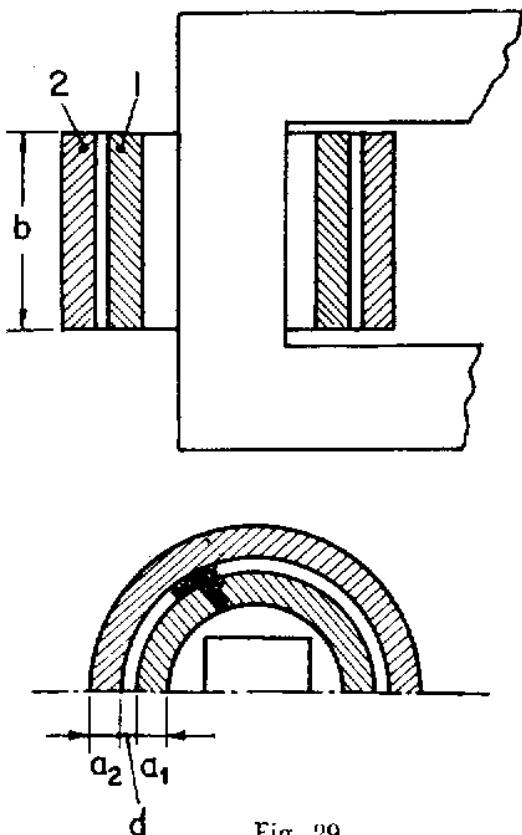


Fig. 29

As indutâncias de dispersão destes enrolamentos são dadas por:

$$L_1 = \frac{0,4 N_1^2}{b} \cdot \left(\frac{d}{2} l_{cum} + \frac{a_1}{3} \cdot l_{cu1} \right) 10^{-8} \text{ henry}$$

$$L_2 = \frac{0,4 N_2^2}{b} \cdot \left(\frac{d}{2} l_{cum} + \frac{a_2}{3} \cdot l_{cu2} \right) 10^{-8} \text{ henry}$$

onde:

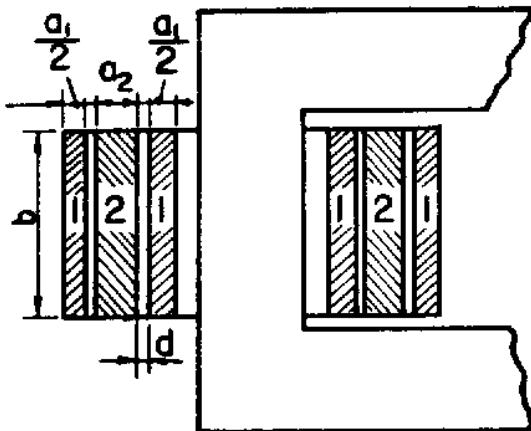


Fig. 30

a_1 = espessura da bobina B.T.
(cm)

a_2 = espessura da bobina A.T.
(cm)

d = espessura do isolante entre
as bobinas (cm)

l_{cu1} = comprimento médio da bo-
bina B.T. (cm)

l_{cu2} = comprimento médio da bo-
bina A.T. (cm)

$$l_{cum} = \frac{l_{cu1} + l_{cu2}}{2} \text{ (cm)}$$

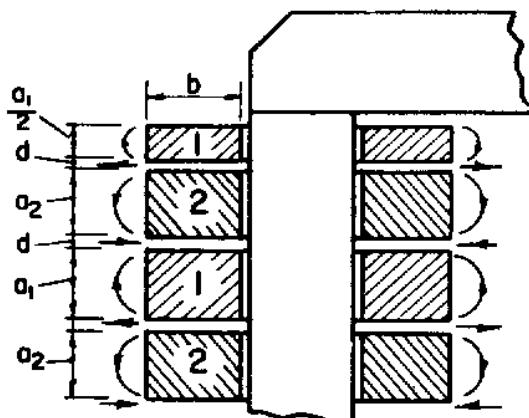


Fig. 31

Pelos enrolamentos tubulares duplos, fig. 30, a indutância é aproximadamente a metade da anterior.

No enrolamento com bobinas alternadas os fluxos dispersos adquirem a forma indicada na fig. 31. A dispersão é tanto menor quanto mais finas e próximas estão as bobinas A.T. e B.T.: a dispersão é mínima se as bobinas terminais do enrolamento B.T. têm a metade das espiras possuídas pelas bobinas intermediárias.

15) DIAGRAMAS VETORIAIS DO TRANSFORMADOR A VAZIO E COM CARGA

Dos fatos expostos resulta que os circuitos do transformador podem ser representados pelo esquema indicado na fig. 32. O transformador industrial é comparado, portanto, a um transformador ideal, sem resis-

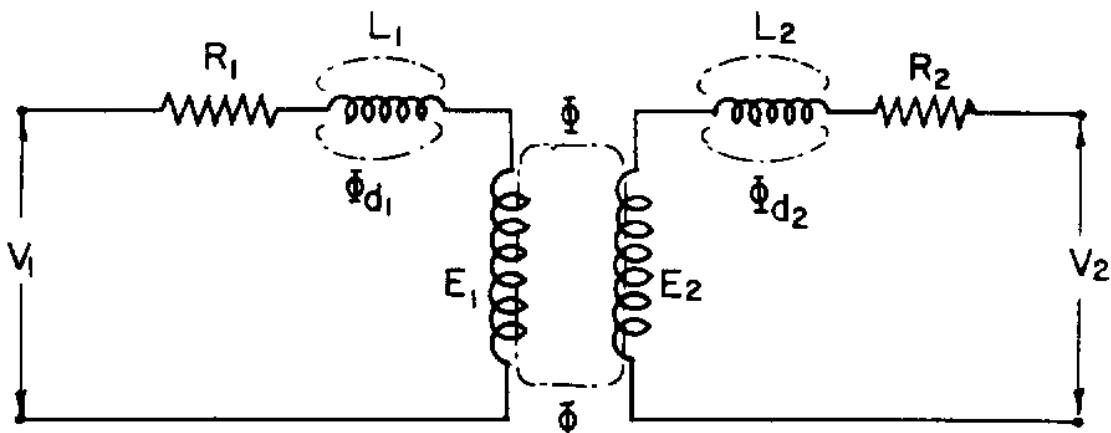


Fig. 32

tências e sem dispersões magnéticas, em cujos circuitos foram inseridas as resistências R_1 e R_2 e as duas indutâncias L_1 e L_2 .

Este esquema permite traçar facilmente os diagramas vetoriais do transformador industrial no funcionamento a vazio e com carga. Se o transformador é trifásico, o esquema representa uma das fases.

a) Funcionamento a vazio

No funcionamento a vazio o circuito secundário do transformador está aberto enquanto o primário é alimentado por uma tensão V_1 , com freqüência f . No núcleo do transformador existe o fluxo Φ produzido pela corrente magnetizante I_μ . A corrente a vazio do transformador é obtida pela composição da corrente magnetizante I_μ e a corrente I_a destinada a compensar as perdas no ferro.

No transformador ideal, pelo fato de não possuir resistências e reatância no circuito primário, não há quedas e por isso $E_1 = V_1$. No núcleo existe o fluxo Φ_o que induz nos dois enrolamentos primário e secundário as f.e.m. respectivas E_1^o e E_2^o , as quais constituem as f.e.m. a vazio do transformador.

Estas f.e.m. são definidas em valor pelas fórmulas seguintes:

$$E_1^o = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_o \cdot N_1$$

$$E_2^o = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_o \cdot N_2,$$

sendo defasadas de 90° em atraso com respeito ao fluxo Φ_o que as induz conforme fig. 33 a.

No transformador comum, provido de resistência e indutância, conforme fig. 32, a corrente primária I_o produz uma queda de tensão ôhmica $R_1 I_o$, em fase com I_o e uma queda $X_1 I_o$ defasada de 90° em adiantamento com respeito a I_o .

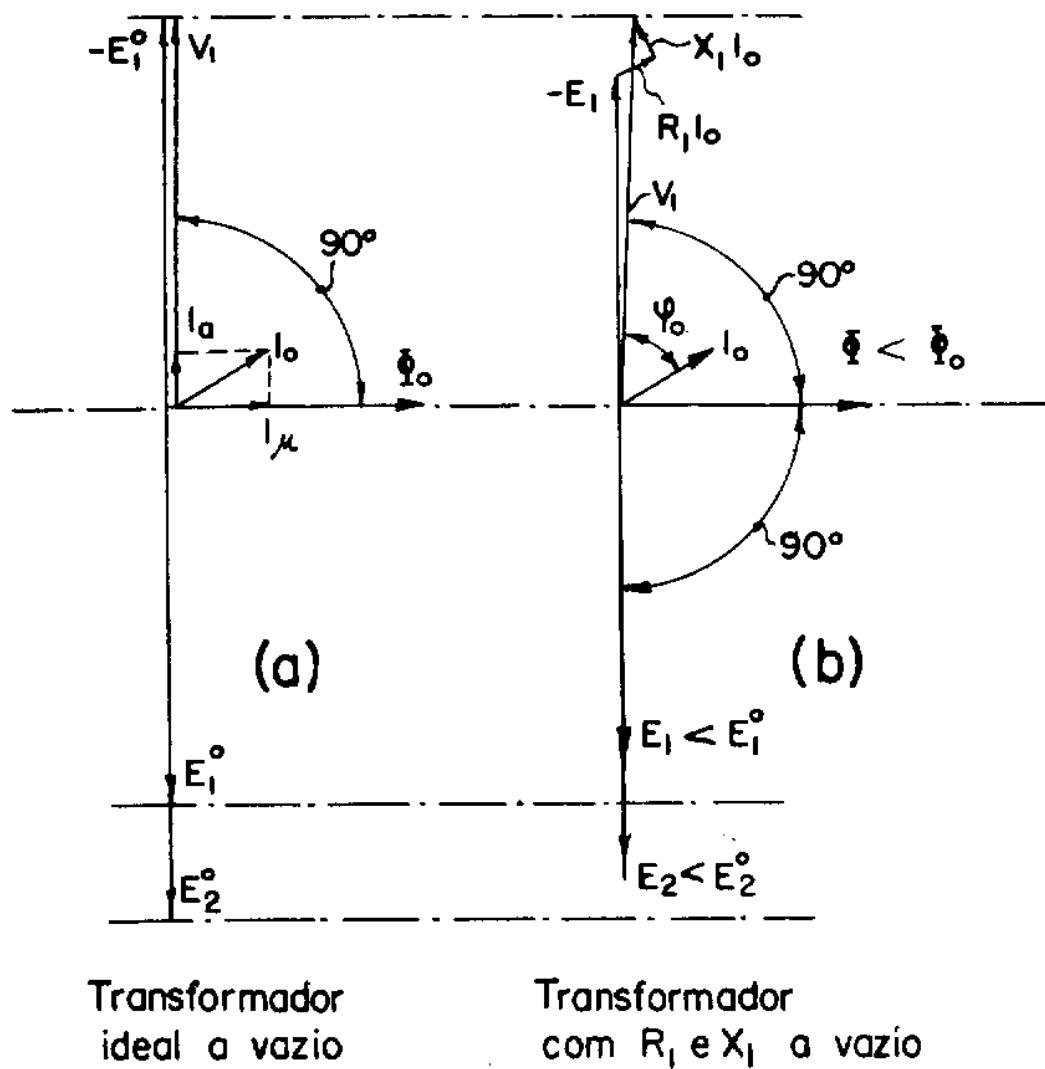


Fig. 33

Pode-se escrever:

$$\overline{V_1} = \overline{(-E_1)} + \overline{R_1 I_o} + \overline{X_1 I_o}$$

ou então $\overline{E_1} = \overline{V_1} - \overline{R_1 I_o} - \overline{X_1 I_o}$. Desta equação resulta claramente que em virtude das quedas de tensão produzidas no enrolamento primário, pela corrente I_o a f.e.m. é menor do que a considerada no transformador ideal E₁^o. Menor será também o fluxo Φ necessário a produzir esta f.e.m. e, por conseguinte, será também menor a f.e.m. E₂ que se manifesta nos bornes do enrolamento secundário. Esta f.e.m. continua sendo expressa pela relação:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \text{ ou, } E_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1} \text{ sendo porém } E_1 < V_1 \text{ resulta } E_2 < V_1 \frac{N_2}{N_1}$$

No funcionamento a vazio a corrente I_o é muito pequena o que permite desprezar as quedas ôhmicas e indutivas, podendo-se escrever:

$$V_2 = E_2 = \sim V_1 \frac{N_2}{N_1}$$

No diagrama da fig. 33 b observa-se que a corrente I_o está defasada em atraso do ângulo ϕ_o com respeito à tensão V_1 .

A fórmula: $W_o = V_1 I_o \cos\phi_o$ representa a potência a vazio do transformador, isto é, as perdas no ferro mais as perdas no cobre $R_1 I_o^2$.

As perdas no cobre $R_2 I_o^2$, devidas à corrente a vazio, são tão pequenas que podem ser praticamente desprezadas, e por conseguinte considerar a potência

$$W_o = V_1 I_o \cos\phi_o$$

como sendo constituída unicamente pelas perdas no ferro.

O fator de potência $\cos\phi_o$ chama-se fator de potência do transformador a vazio.

b) Funcionamento com carga

Ao transformador funcionando com carga corresponde o esquema indicado na fig. 34. O primário é alimentado pela tensão V_1 enquanto o secundário alimenta um circuito de impedância Z , que por exemplo se considera indutiva.

A corrente I_2 estará defasada em atraso do ângulo ϕ_2 com relação à tensão V_2 , conforme o diagrama da fig. 35.

A fim de melhor esclarecer os fenômenos que se verificam com o transformador funcionando com carga, o diagrama relativo será com-

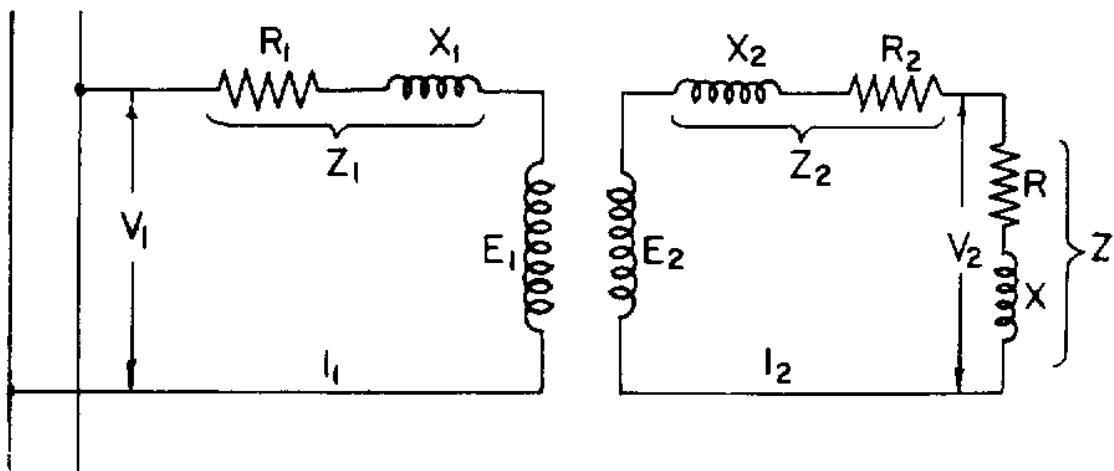


Fig. 34

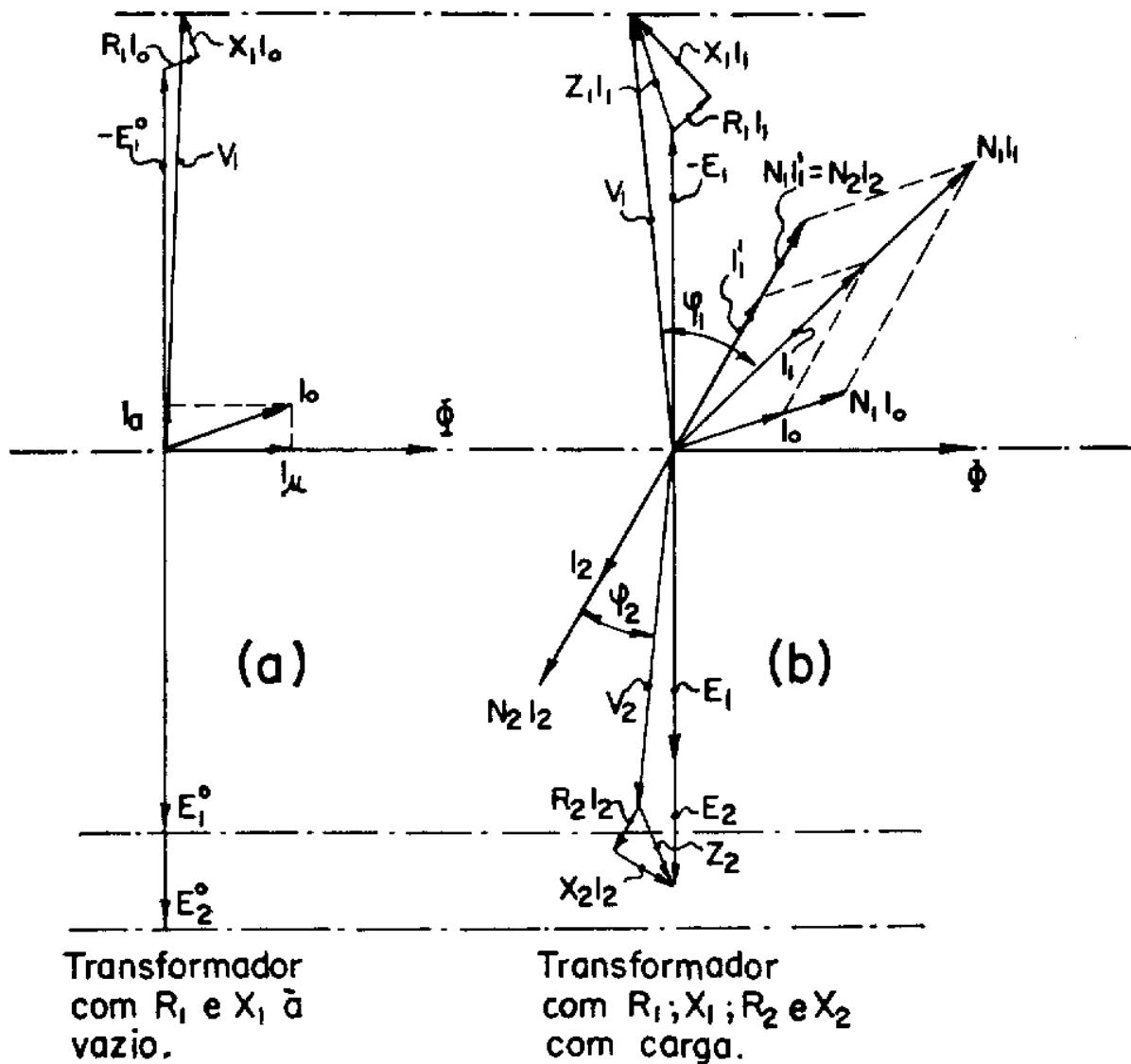


Fig. 35

parado com o diagrama do funcionamento a vazio do mesmo, conforme fig. 35.

Como é sabido, ao circular a corrente I_2 no circuito secundário, esta produz uma f.m.m. $N_2 I_2$ que tende a alterar o equilíbrio magnético. Para anular o efeito da f.m.m. $N_2 I_2$, o circuito primário absorve da linha de alimentação a corrente I_1' , cujo valor é tal que pode criar a f.m.m. $N_1 I_1'$ igual e contrária a $N_2 I_2$. A composição geométrica da corrente I_1' e da corrente I_o fornece a corrente primária I_1 . Esta corrente produz uma queda ôhmica primária $R_1 I_1$ em fase com I_1 e uma queda indutiva $X_1 I_1$, defasada de 90° em adiantamento sobre I_1 . Estas duas quedas deduzidas da tensão primária fornecem a f.e.m. primária E_1 , isto é:

$$\overline{E_1} = \overline{V_1} - \overline{X_1 I_1} - \overline{R_1 I_1}$$

Esta f.e.m. E_1 é consideravelmente inferior à f.e.m. primária E_1^o que se manifesta com o transformador a vazio, isto porque, aumentando a corrente primária, aumentam as quedas de tensão e, portanto, diminui a f.e.m. que deve ser gerada.

A diminuição da f.e.m. E_1 traz como consequência a diminuição do fluxo Φ .

No funcionamento com carga, o fluxo no núcleo do transformador é levemente inferior ao fluxo existente no mesmo quando o funcionamento é a vazio.

A diminuição do fluxo traz uma diminuição da f.e.m. E_2 gerada no secundário. Observa-se assim a interferência do circuito primário no funcionamento do circuito secundário do transformador.

A corrente I_2 ao atravessar o enrolamento secundário provoca as quedas de tensão $R_2 I_2$ e $X_2 I_2$, respectivamente em fase e defasada de 90° em adiantamento com respeito a I_2 . Em vista destas quedas de tensão, a tensão V_2 disponível nos bornes dos enrolamentos secundários resulta:

$$\overline{V}_2 = \overline{E}_2 - \overline{R}_2 I_2 - \overline{X}_2 I_2$$

A composição das quedas $R_2 I_2$ e $X_2 I_2$ fornece a queda de tensão total primária.

$$\Delta V_1 = Z_1 I_1 \text{ onde } Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$$

Analogamente a composição das quedas $R_2 I_2$ e $X_2 I_2$ fornece a queda de tensão total secundária

$$\Delta V_2 = Z_2 I_2 \text{ onde } Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$$

Observa-se ainda que para cargas normais onde a corrente I_1' é muito elevada em relação a I_o a corrente $I_1 = \sim I_1'$ e o fator de potência primário é aproximadamente igual ao do secundário.

Outro fato importante a ser observado é que a relação $\frac{E_1}{E_2}$ coincide

sempre com a relação das espiras $\frac{N_1}{N_2}$, chamando-se esta última de

relação de transformação a vazio. A relação $\frac{V_1}{V_2}$ é levemente diferente da anterior, sendo chamada de relação de transformação com carga.

16) CIRCUITO SECUNDÁRIO EQUIVALENTE

Foi visto no parágrafo anterior que as quedas de tensão do circuito primário de um transformador afetam o funcionamento do circuito secundário, isto é, quanto mais altas forem as quedas de tensão primária, menor será a tensão secundária.

A fim de simplificar os cálculos e a interpretação dos fenômenos relativos aos transformadores industriais, concebeu-se o chamado circuito equivalente, ou seja, considera-se um dos circuitos como sendo o ideal, enquanto o outro possui uma impedância de valor global tal que atravessada pela corrente do enrolamento produz todas as quedas de tensão.

Assim sendo, se no transformador indicado na fig. 36 imagina-se colocar as resistências e as reatâncias no circuito secundário do mesmo, conforme indica a fig. 37, obter-se-á um circuito fictício chamado *círculo secundário equivalente do transformador*.

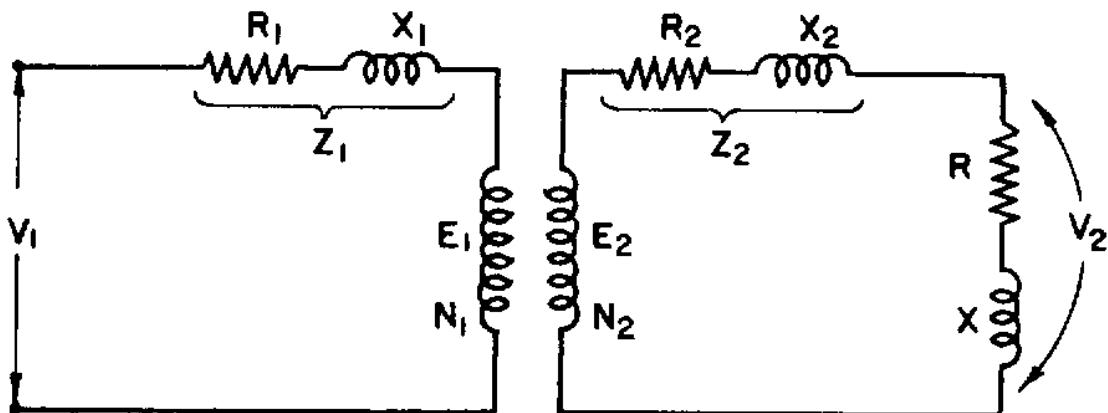


Fig. 36

A fim de tornar mais simples o uso das fórmulas, indica-se com $m = \frac{N_1}{N_2}$ a letra m a relação de transformação do aparelho, ou seja

Ao transferir a f.e.m. primária para o circuito secundário, deve-se dividi-la por m , pois $E_1 : E_2 = N_1 : N_2$ de onde $E_2 = \frac{E_1}{m} = \frac{E_1}{N_1/N_2}$

Analogamente, desejando-se transferir a queda de tensão primária $V_1 = Z_1 I_1$ para o secundário, deve-se dividi-la também por m , isto é:

$$\Delta V_2' = \frac{\Delta V_1}{m} = \frac{Z_1 I_1}{m}$$

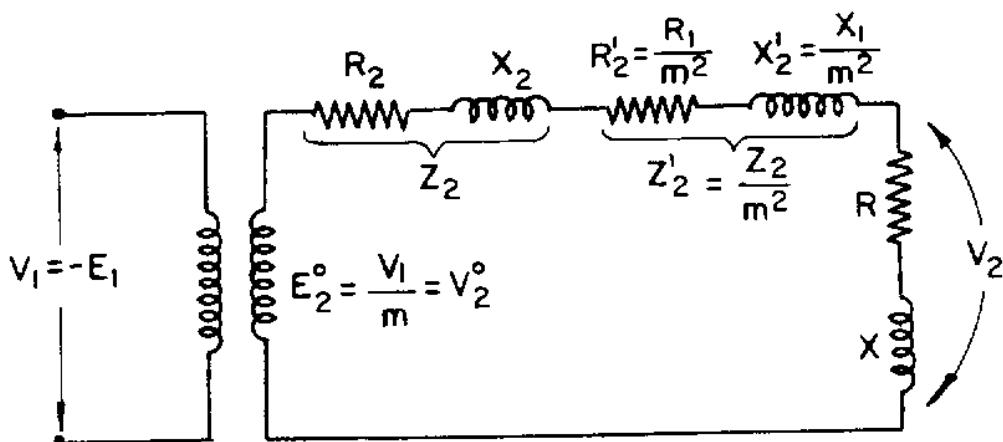


Fig. 37

Se, em lugar da corrente I_1 , deseja-se usar a corrente secundária, é preciso lembrar que $I_1 : I_2 = N_2 : N_1$, de onde

$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_2}{N_1/N_2} = \frac{I_2}{m}$$

Substituindo-se este valor na fórmula da queda de tensão primária transferida ao secundário, obtém-se:

$$\Delta V_2' = \frac{Z_1 \cdot I_2 / m}{m} = \frac{Z_1}{m^2} I_2$$

Esta última expressão permite afirmar que a queda de tensão secundária $\Delta V_2'$ resultante da queda de tensão primária, é obtida pelo produto do fator $\frac{Z_1}{m^2}$ pela corrente secundária I_2 . Ao fator $\frac{Z_1}{m^2}$ dá-se o nome de *impedância primária transferida ao secundário* e indica-se com Z_2' , isto é:

$$Z_2' = \frac{Z_1}{m^2} \text{ e } \Delta V_2' = Z_2' I_2$$

Para todos os efeitos, o fator Z_2' representa uma impedância que inserida ao secundário do transformador produz os mesmos efeitos que a impedância Z_1 produz no circuito primário. A impedância Z_2' é representada no circuito secundário, ligada em série à impedância Z_2 do próprio circuito, conforme fig. 37.

Com demonstração análoga à que foi feita para se obter a fórmula $Z_2' = \frac{Z_1}{m^2}$ obtém-se também os valores dos seus fatores componentes, isto é:

$$R_{2'} = \frac{R_1}{m^2} \text{ e } X_{2'} = \frac{X_1}{m^2}$$

Com a suposição feita, o transformador indicado na fig. 37 possui o circuito primário sem resistência e reatância, e, por conseguinte, neste circuito nenhuma queda de tensão se produz. Toda a tensão aplicada V_1 transforma-se, tanto a vazio como com carga, na f.e.m. secundária.

$$E_2'' = \frac{V_1}{m}$$

Todas as quedas de tensão são atribuídas ao circuito secundário, o qual possui a sua própria impedância Z_2 e em série a esta a impedância primária transferida ao secundário $Z_2' = \frac{Z_1}{m^2}$

A este circuito corresponde o diagrama vetorial indicado na fig. 38 a, o qual permite com facilidade observar a queda de tensão que se verifica quando o transformador trabalha com carga, isto é: $\overline{\Delta V_2} = \overline{E_2''} - \overline{V_2}$. Esta queda total compõe-se de uma queda ôhmica $R_2 I_2 + R_{2'} I_2 = (R_2 + R_{2'}) I_2$ em fase com I_2 e de uma queda indutiva $X_2 I_2 + X_{2'} I_2 = (X_2 + X_{2'}) I_2$ defasada de 90° em adiantamento com respeito a I_2 pondo: $(R_2 + R_{2'}) = R_e''$ e $(X_2 + X_{2'}) = X_e''$

pode-se escrever: $\overline{\Delta V} = \overline{R_e''} I_2 + \overline{X_e''} I_2 = Z_e'' I_2$ conforme indica o diagrama da fig. 38 b. Sendo Z_e'' a impedância equivalente secundária do transformador. A resistência R_e'' e a reatância X_e'' são respectivamente a resistência e a reatância equivalentes secundárias do transformador, definidas por:

$$R_e'' = R_2 + \frac{R_1}{m^2} \text{ e } X_e'' = X_2 + \frac{X_1}{m^2}$$

A impedância equivalente secundária Z_e'' é definida por:

$$Z_e'' = \sqrt{(R_e'')^2 + (X_e'')^2}$$

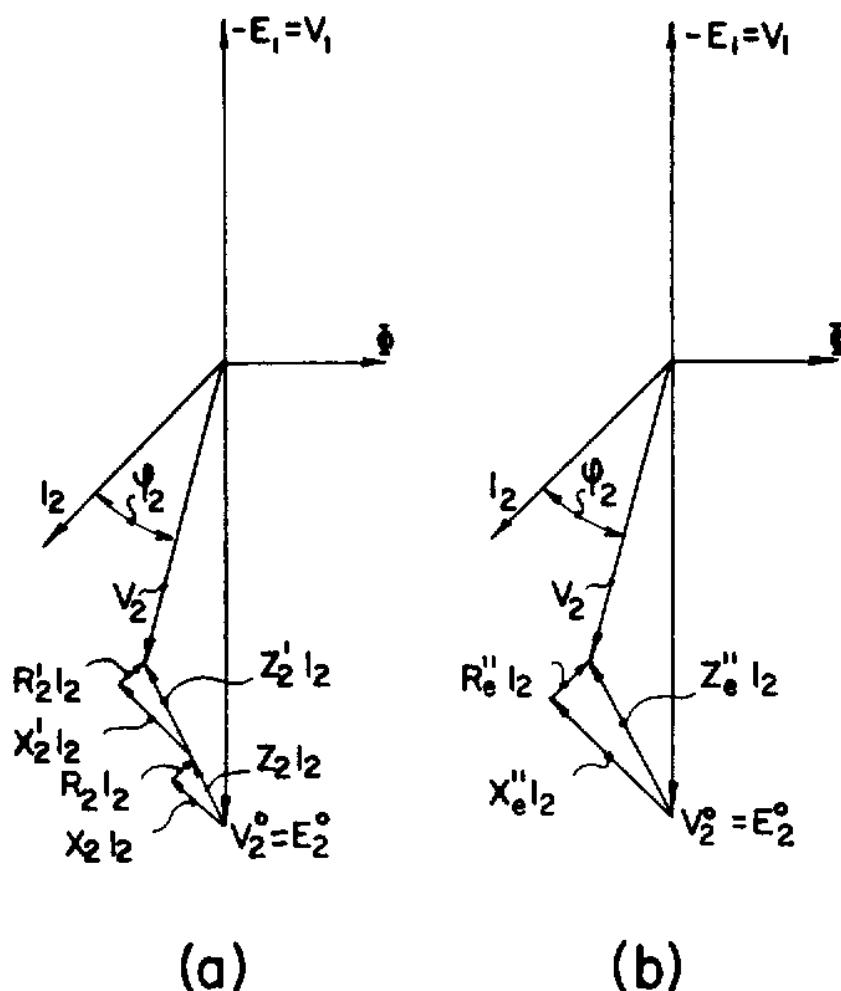


Fig. 38

17) CIRCUITO PRIMÁRIO EQUIVALENTE

Com raciocínio inverso ao feito precedentemente, supõe-se que todas as quedas do transformador sejam produzidas pelo circuito primário, enquanto o secundário seja um circuito sem quedas. Neste caso deve-se considerar o circuito fictício indicado na fig. 39, o qual constitui o *círcuito primário equivalente* do transformador. Este compreende a resistência e a reatância própria do enrolamento primário R_1 e X_1 , tendo em série a estes a resistência e a reatância secundárias transferidas ao primário R_1'' e X_1'' .

O enrolamento secundário não apresenta impedância alguma.

Pondo $m = \frac{N_1}{N_2}$ e sendo $R_2 I_2$ e $X_2 I_2$ as duas quedas secundárias,

para transferi-las ao circuito primário devem ser multiplicadas por m, isto é: $m R_2 I_2$ e $m X_2 I_2$.

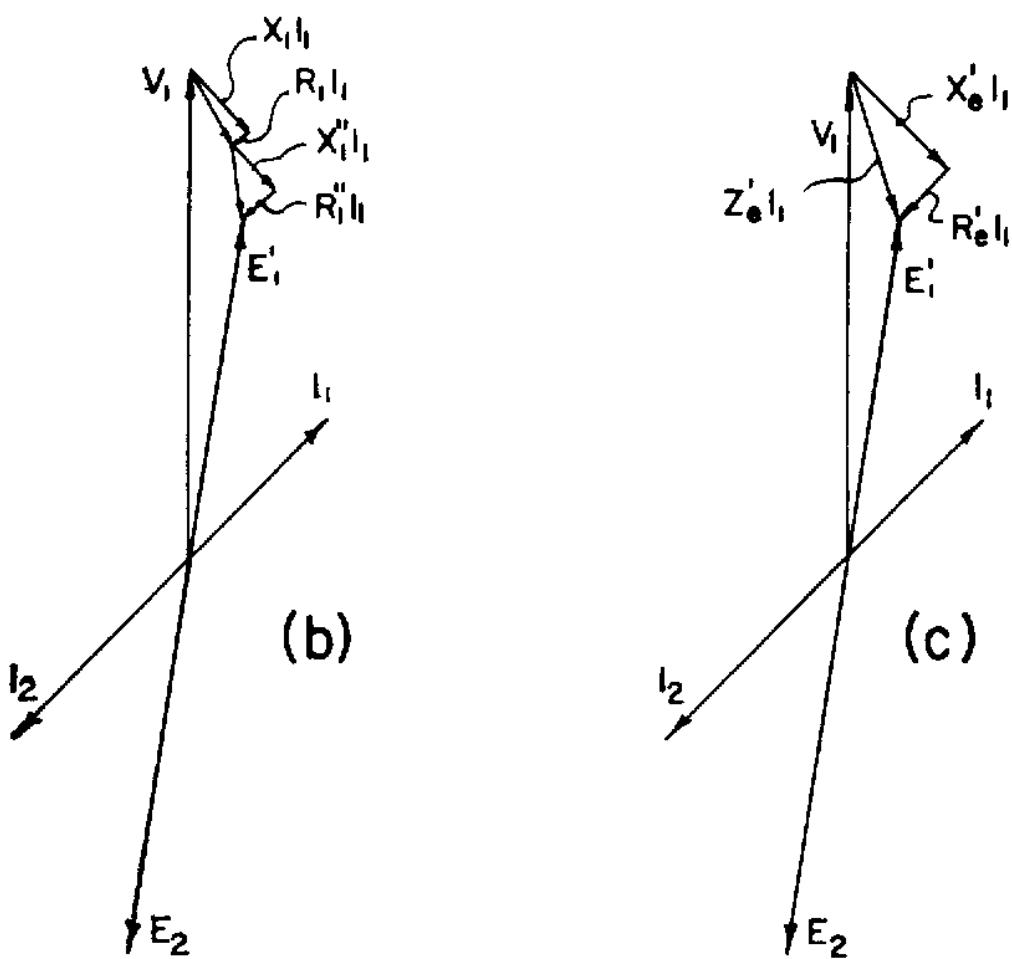
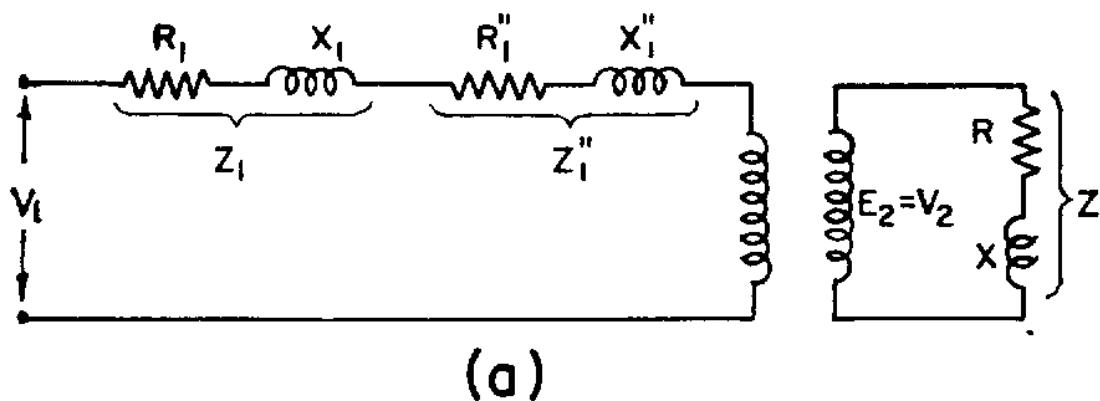


Fig. 39

Desprezando-se a corrente a vazia e pondo-se $I_1 = \frac{I_2}{m}$ e, portanto

$I_2 = m I_1$, as duas quedas resultam: $m^2 R_2 I_1$ e $m^2 X_2 I_1$ ou $R''_1 I_1$ e $X''_1 I_1$.

A resistência total $R_e' = R_1 + R_1'' = R_1 + m^2 R_2$ constitui a resistência primária equivalente do transformador. Analogamente a reatância total

$X'_e = X_1 + X''_1 = X_1 + m^2 X_2$ constitui a reatância primária equivalente do transformador. E por fim a impedância global definida por:

$$Z'_e = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2}$$

constitui a impedância equivalente primária.

O diagrama do transformador adquire a forma indicada nas figuras 39 b e 39 c.

A tensão aplicada V_1 resulta diminuída das quedas $R'_e I_1$ e $X'_e I_1$ obtendo-se a f.e.m. primária E'_1 que se transforma integralmente na tensão secundária $V_2 = \frac{V_1}{m}$. Sendo a tensão secundária a vazio $V_2^0 = \frac{V_1}{m}$.

A queda de tensão que se manifesta é

$$\Delta V = \overline{V_2^0} - \overline{V_2}$$

a qual é expressa em função da corrente primária pela relação

$$\Delta V = \frac{\overline{V_1} - \overline{E}_1}{m} = \frac{Z'_e \cdot I_1}{m}$$

18) FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR EM CURTO-CIRCUITO E DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA E DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE

Ligando-se em curto-círcuito os bornes secundários de um transformador, inserindo-se unicamente entre eles um amperímetro, pela medição da corrente secundária, como no esquema da fig. 40, a tensão secundária resulta praticamente nula. Em tais condições, toda f.e.m. secundária deve vencer exclusivamente a impedância secundária Z_2 como é indicado no diagrama vetorial da fig. 40 b e a corrente secundária resulta defasada em atraso com respeito à f.e.m. do ângulo ϕ_{ce} definido por:

$$t_g \phi_{2ce} = \frac{X_2}{R_2}$$

Querendo-se que a corrente secundária adquira uma intensidade prefixada I_2 , a f.e.m. secundária deve ter o valor $E_{2ce} = Z_2 I_2$.

A f.e.m. assim definida é chamada f.e.m. secundária de curto-círcuito relativa à prefixada corrente I_2 . O fluxo Φ_{ce} que é necessário para

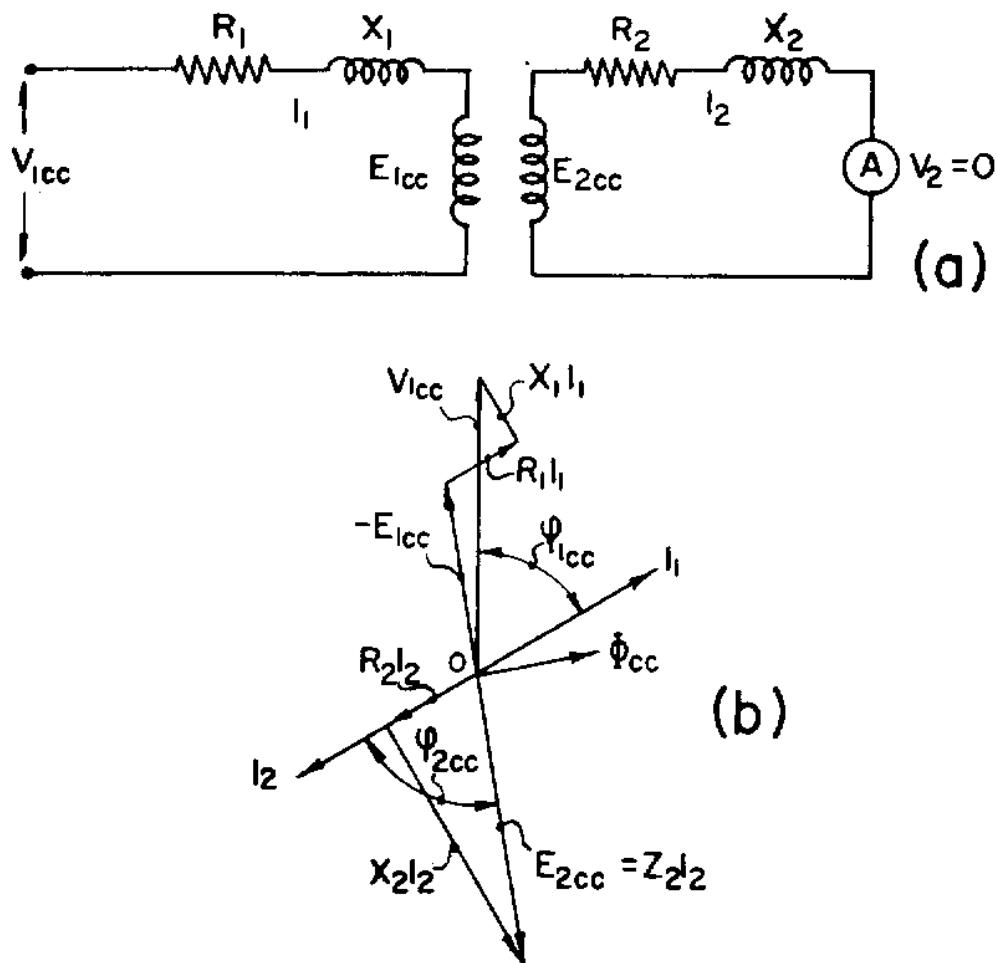


Fig. 40

gerar esta f.e.m. constitui o fluxo de curto-círcuito e correspondentemente tem-se a f.e.m. primária de curto-círcuito definida por:

$$E_{1cc} = E_{2cc} \frac{N_1}{N_2} = m E_{2cc}$$

Obtém-se a tensão primária V_{1cc} traçando-se em seguida ao vetor ($-E_{1cc}$) as quedas primárias $R_1 \cdot I_1$ e $X_1 \cdot I_1$. A tensão assim obtida representa a tensão que se deve aplicar nos bornes primário, para fazer circular no secundário fechado em curto-círcuito a prefixada corrente I_2 .

Na linguagem técnica, chama-se de tensão de curto-círcuito do transformador a tensão V_{1cc} , que se deve aplicar no primário para fazer circular no secundário fechado em curto-círcuito a corrente normal de plena carga do transformador. Sendo muito pequenas as quedas internas do transformador, esta tensão resulta sempre muito pequena e

precisamente compreendida entre 5% e 10% da tensão primária de exercício normal do transformador. Isto quer dizer que também as f.e.m. primária e secundária de curto-círcuito são muito pequenas com respeito aos valores de regime normal e, portanto, é pequeno também o fluxo no núcleo. O fluxo de curto-círcuito Φ_{cc} relativo à corrente secundária de plena carga varia entre 2 e 5% do fluxo correspondente ao regime normal de exercício do transformador. Deste fato resultam as duas propriedades importantes relativas ao funcionamento em curto-círcuito do transformador.

Em primeiro lugar, sendo muito pequeno o fluxo do núcleo, também a f.m.m. necessária para produzi-lo será muito pequena: isto quer dizer que no funcionamento em curto-círcuito as duas f.m.m. primária $N_1 I_1$ e secundária $N_2 I_2$ quase se equilibram (pode-se considerar a corrente primária como corrente de reação, sendo absolutamente desprezível a corrente I_{occ} que é necessária para produzir o fluxo Φ_{cc}).

Conseqüentemente, no funcionamento em curto-círcuito as correntes primária e secundária satisfazem quase exatamente a relação

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m.$$

Em segundo lugar verifica-se que, no funcionamento em curto-círcuito, as perdas no ferro se tornam completamente desprezíveis, pois fica muito pequena a indução magnética no núcleo. A inteira potência absorvida pelo transformador (potência de curto-círcuito) corresponde simplesmente à potência dissipada pelo efeito Joule nos dois enrolamentos, ou como se costuma dizer às perdas no cobre do transformador.

Indicando-se, portanto, tal potência com W_{cc} obter-se-á

$$W_{cc} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$

e pondo-se $I_1 = \frac{I_2}{m}$ pode-se escrever

$$W_{cc} = R_1 \left(\frac{I_2}{m} \right)^2 + R_2 I_2^2 = \left(\frac{R_1}{m^2} + R_2 \right) I_2^2$$

e enfim

$$W_{cc} = R''_e I_2^2$$

sendo $R''_e = \frac{R_1}{m^2} + R_2$ a resistência equivalente secundária do transformador, já definida anteriormente.

Medindo-se então a potência W_{ee} e a corrente I_2 , tem-se o meio de determinar experimentalmente a resistência equivalente secundária por meio da relação $R''_e = \frac{W_{ee}}{I_2^2}$.

A resistência equivalente R''_e pode ser determinada medindo-se separadamente a resistência primária R_1 e secundária R_2 e conhecendo-se a relação das espiras $\frac{N_1}{N_2} = \frac{R_1}{m^2}$, pois $R''_e = R_2 + \frac{R_1}{m^2}$.

Com base no diagrama da fig. 40b, a potência de curto-círcuito é expressa pela relação $W_{ee} = V_{1ee} I_1 \cdot \cos\phi_{1ee}$.

Para a medida desta potência é suficiente então inserir um wattímetro no circuito primário do transformador.

Aplicando-se o critério de referir todas as quedas ao circuito secundário, o funcionamento em curto-círcuito corresponde ao circuito equivalente indicado na fig. 41a: o diagrama vetorial relativo, adquire a forma indicada na fig. 41b. A tensão de curto-círcuito V_{1ee} , transforma-se na f.e.m. fictícia $E''_{ee} = \frac{V_{1ee}}{m}$, a qual constitui a tensão de curto-círcuito existente no secundário.

Sendo $Z''_e = \sqrt{(R''_e)^2 + (X''_e)^2}$ a impedância equivalente secundária do transformador, verifica-se:

$$E''_{ee} = Z''_e I_2$$

Medindo-se com um voltímetro a tensão de curto-círcuito V_{1ee} aplicada ao primário e pondo $E''_{ee} = \frac{V_{1ee}}{m}$ pode-se determinar a impedância equivalente secundária Z''_e por meio da relação

$$Z''_e = \frac{V_{1ee}}{m I_2}$$

Tendo já determinado antes a resistência equivalente R''_e pode-se então determinar a reatância equivalente.

$$X''_e = \frac{X_1}{m^2} + X_2$$

pela relação

$$X''_e = \sqrt{(Z''_e)^2 - (R''_e)^2}$$

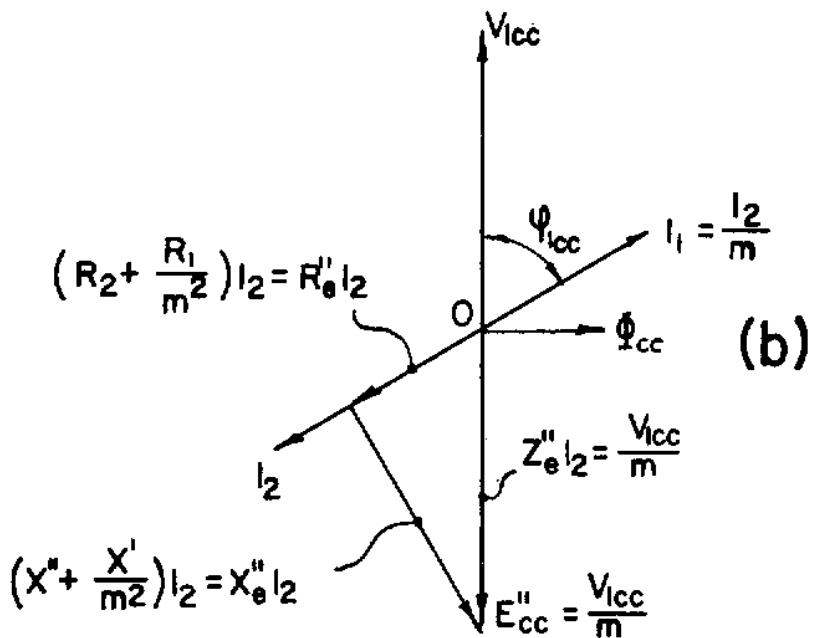
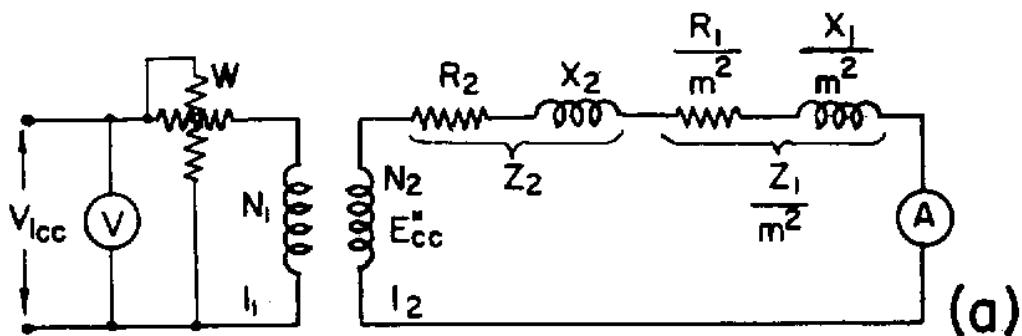


Fig. 41

O fator de potência de curto-circuito resulta das seguintes relações:

$$\cos\phi_{1cc} = \frac{R_e''}{Z_e''} \text{ ou } \cos\phi_{1cc} = \frac{W_{cc}}{V_{1cc} I_1} = \frac{W_{cc}}{V_{1cc} I_2} m$$

Com o ensaio de curto-círcito do transformador, podem-se determinar todas as grandezas necessárias para se definir o circuito equivalente secundário, e, portanto, *tudo o que for preciso para se determinar as quedas de tensão que se verificam na passagem do funcionamento em vazio para o com carga do transformador.*

Se, pelo contrário, interessa conhecer os elementos do circuito equivalente primário, é suficiente considerar-se o transformador, conforme esquema da fig. 42 resultando:

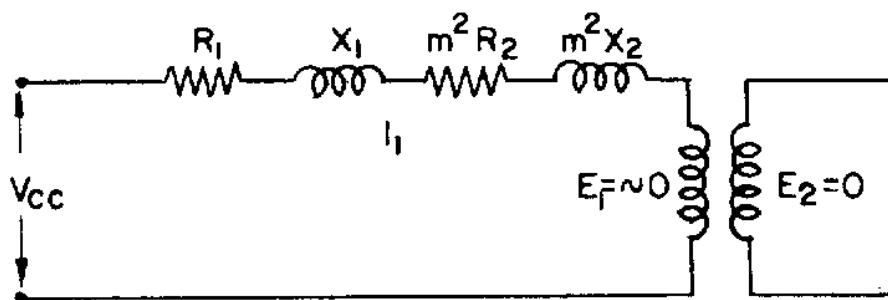


Fig. 42

$$Z'_e = \frac{V_{1ee}}{I_1} \text{ e } R'_e = R_1 + m^2 R_2 = \frac{W_{ee}}{I_1^2};$$

resulta então $X'_e = \sqrt{(Z'_e)^2 - (R'_e)^2}$

É fácil verificar que a resistência, a reatância e a impedância equivalentes primárias estão interligadas às grandezas correspondentes secundárias pelas relações

$$R'_e = m^2 R''_e$$

$$X'_e = m^2 X''_e$$

$$Z'_e = m^2 Z''_e$$

As resistências, reatâncias e impedâncias relativas ao circuito secundário podem ser transferidas ao circuito primário, multiplicando-se pelo quadrado da relação das espiras $\frac{N_1}{N_2}$

19) O ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO NOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

As considerações expostas referem-se particularmente aos transformadores monofásicos, mas estendem-se facilmente aos transformadores trifásicos, considerando-se a resistência e a reatância equivalente de cada fase.

O ensaio de curto-círcuito neste caso é feito com base no esquema da fig. 43, isto é, alimentando-se os circuitos primários com a tensão V_{1ee} , enquanto os circuitos secundários estão fechados em curto-círcuito sobre três amperímetros com pequena resistência. A potência de curto-círcuito W_{ee} deve ser medida com o método de dois wattímetros.

Um voltímetro comutável sobre as três fases mede a tensão de curto-círcuito V_{1ee} . Para deduzir os valores da resistência e da impedância equivalentes em cada fase, é suficiente tomar-se em consideração o tipo

de agrupamento interno das fases. Se o transformador tem conexão estrela-estrela, a corrente I_2 medida pelos amperímetros representa a corrente que atravessa as fases secundárias, enquanto a tensão aplicada a cada fase primária é igual à tensão V_{1cc} , indicada pelo voltímetro, dividida por $\sqrt{3}$. A impedância equivalente secundária de cada fase resulta

$$Z''_e = \frac{V_{1cc}}{\sqrt{3} m I_2}$$

e a resistência equivalente secundária de uma fase é

$$R''_e = \frac{W_{ee}}{3I_2^2}$$

sendo W_{ee} a soma algébrica das potências indicadas pelos dois wattímetros.

Na conexão estrela-triângulo deverão ser divididas por $\sqrt{3}$, tanto a tensão V_{1cc} indicada pelo voltímetro como a corrente I_2 indicada pelos amperímetros; ter-se-á, portanto,

$$Z''_e = \frac{V_{1cc}/\sqrt{3}}{m \cdot I_2/\sqrt{3}} = \frac{V_{1cc}}{m \cdot I_2} \quad \text{e} \quad R''_e = \frac{W_{ee}}{3 \left(\frac{I_2}{\sqrt{3}} \right)^2} = \frac{W_{ee}}{I_2^2}$$

Enfim, pela conexão triângulo-estrela não é preciso dividir nem a tensão nem a corrente pela $\sqrt{3}$ e resulta:

$$Z''_e = \frac{V_{1cc}}{m \cdot I_2} \quad \text{e} \quad R''_e = \frac{W_{ee}}{3 I_2}$$

Em todos os casos m representa a relação das espiras $\frac{N_1}{N_2}$ de cada fase, isto é, a relação de transformação a vazio entre a tensão de fase

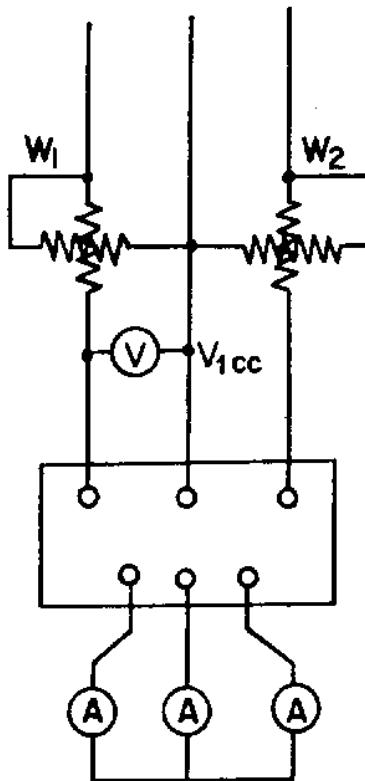


Fig. 43

primária e a tensão de fase secundária. O fator de potência de curto-círcuito pode ser calculado em todos os casos pela fórmula

$$W_{ee} = \sqrt{3} V_{1ee} \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_{1ee} = \sqrt{3} V_{1ee} \cdot \frac{I_2}{m} \cdot \cos\varphi_{1ee}$$

Com os valores da resistência e da impedância assim determinados, fica definido o circuito equivalente secundário de uma fase.

Observa-se que o fator de potência de curto-círcuito pode ficar tanto maior quanto menor do que 0,5; portanto, na medida da potência será necessário assegurar-se se as indicações dos wattímetros devem ser somadas ($\cos\varphi_{1ee} > 0,5$) ou subtraídas ($\cos\varphi_{1ee} < 0,5$).

20) CÁLCULO DA REATÂNCIA DE DISPERSÃO DOS TRANSFORMADORES

Como já foi examinado no parágrafo 14, a indutância e, portanto, a reatância de dispersão de um transformador depende da forma, do tamanho e da posição recíproca das bobinas.

Serão dadas agora as fórmulas para o cálculo da reatância equivalente referida ao primário dos vários tipos de transformadores.

a) Enrolamento tubular, fig. 44

Neste tipo de enrolamento a reatância de dispersão referida ao primário resulta expressa em ohms, pela fórmula

$$X'_e = 7,9 \frac{f \cdot l_{eu} \cdot N_1^2}{b} K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-8}$$

na qual

f = freqüência

l_{eu} = comprimento médio das espiras do enrolamento primário e secundário (cm)

$$l_{eu} = \frac{l_{eu1} + l_{eu2}}{2}$$

onde l_{eu1} = comprimento da espira média primária e l_{eu2} = comprimento da espira média secundária (cm)

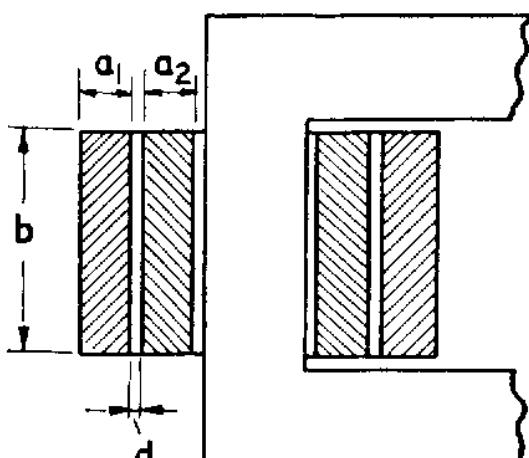


Fig. 44

N_1 = número das espiras primárias

b = altura (comprimento axial da bobina) (cm)

d = espessura radial do intervalo entre as duas bobinas

a_1 = espessura da bobina A.T. (cm)

a_2 = espessura da bobina B.T. (cm)

K = fator de correção =

$$= \sim 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2d + a_1 + a_2}{b}$$

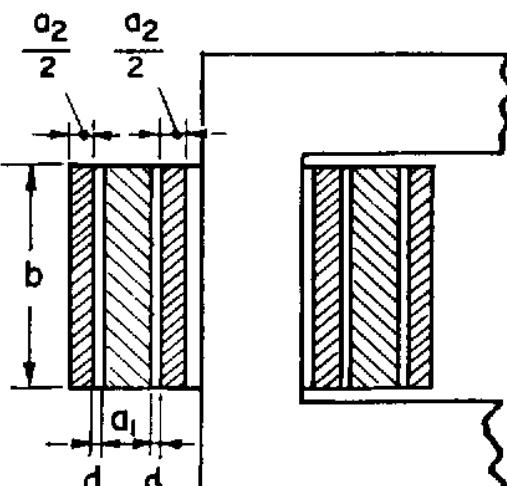


Fig. 45

b) *Enrolamento tubular duplo*, fig. 45

Alcança-se uma notável diminuição da reatância de dispersão, subdividindo-se um dos dois enrolamentos (de preferência o B.T.). Com esta disposição o enrolamento toma o nome de enrolamento tubular duplo. A reatância equivalente primária é expressa em ohms pela seguinte equação

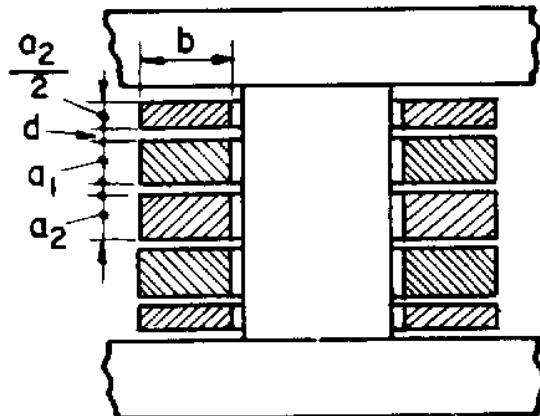


Fig. 46

c) *Enrolamento de discos*

Com o enrolamento de discos indicados na fig. 46, o fator b representa o comprimento radial das bobinas, a_1 e a_2 a altura axial das bobinas B.T. e A.T. A altura das bobinas extremas B.T. é metade da altura das bobinas internas. Para este tipo a reatância equivalente primária é expressa em ohms pela seguinte equação:

$$X'_e = 3,95 \frac{f \cdot l_{eu} \cdot N_1^2}{q \cdot b} K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) 10^{-8}$$

Onde q representa o número das bobinas secundárias.

21) DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE TENSÃO INDUSTRIAL —
DIAGRAMA DE KAPP — CARACTERÍSTICAS EXTERNAS
DO TRANSFORMADOR

A queda industrial de tensão de um transformador é representada pela diferença aritmética entre a tensão secundária a vazio E_2^0 e a tensão secundária com carga V_2 . O valor desta queda nas diferentes condições de carga do transformador pode ser determinado com base nos diagramas vetoriais já considerados precedentemente.

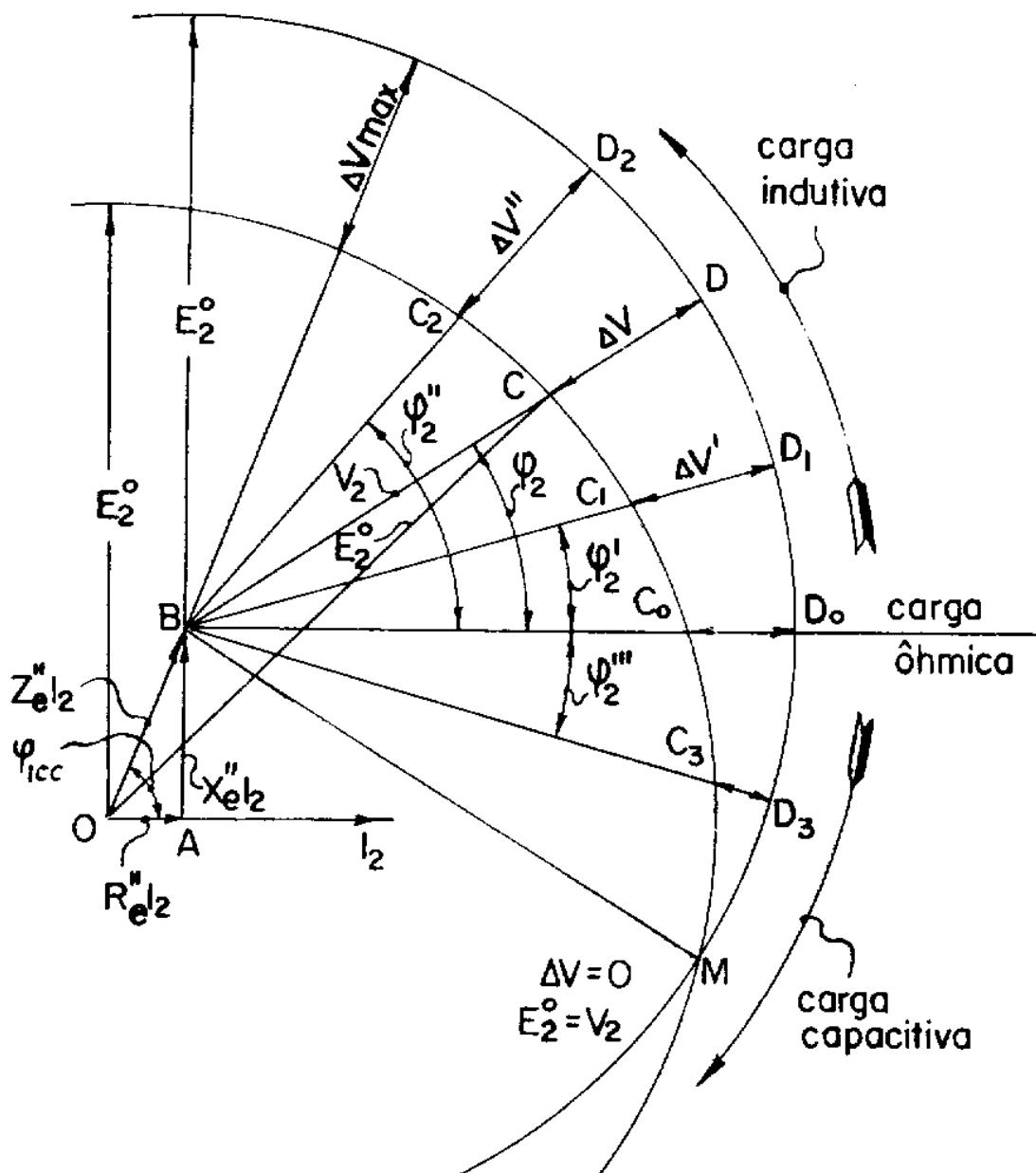


Diagrama de Kapp para I₂ constante e cosΨ variável

Fig. 47

Para a solução deste problema, usa-se em geral construir o diagrama do transformador numa forma diferente, conhecida pelo nome de diagrama de Kapp.

Para a construção deste diagrama é necessário conhecer previamente a resistência, a reatância e a impedância equivalente secundárias R''_e , X''_e , Z''_e . Com a ajuda da corrente secundária de plena carga, constrói-se então o triângulo retângulo (OAB), que tem por catetos $OA = R''_e I_2$ e $AB = X''_e I_2$ como indica a fig. 47. Este triângulo toma o nome de triângulo fundamental do transformador.

Com centro em O, traça-se uma circunferência com o raio equivalente à tensão a vazio E^o_2 ; cada vetor, como por exemplo BC, representa, portanto, a tensão V_2 que fica disponível nos bornes do transformador quando este fornece a corrente I_2 defasada do ângulo φ_2 com respeito a $BC = V_2$ (o triângulo assim construído traduz de fato a relação vetorial $E^o_2 = V_2 + R''_e I_2 + X''_e I_2$ que é a conhecida equação relativa ao circuito equivalente secundário do transformador). Com centro em B, traça-se uma segunda circunferência que tem ainda por raio a tensão a vazio E^o_2 , é claro que o segmento \overline{CD} representa a diferença aritmética entre E^o_2 e V_2 : isto quer dizer que o segmento CD fornece a queda de tensão industrial $\Delta V = E^o_2 - V_2$ correspondente ao funcionamento a plena carga do transformador sobre um circuito que tem um fator de potência igual a $\cos\varphi_2$. Variando o fator de potência, mantendo-se invariada a corrente fornecida, a queda de tensão varia como os segmentos $\overline{C_1D_1}$ e $\overline{C_2D_2}$ etc. os quais correspondem respectivamente às defasagens secundárias φ_2' , φ_2'' etc.

O diagrama põe claramente em relevo que aumentando o ângulo de atraso da corrente sobre a tensão, isto é, diminuindo o fator de potência, a queda de tensão aumenta. A queda de tensão adquire o valor máximo quando a defasagem φ_2 é igual à defasagem de curto-circuito φ_{1cc} do transformador, definida por

$$\text{tag. } \varphi_{1cc} = \frac{X''_e}{R''_e} \text{ ou } \cos\varphi_{1cc} = \frac{R''_e}{Z''_e}.$$

Se o transformador funciona com carga puramente ôhmica, a queda de tensão é representada pelo segmento $\overline{C_oD_o}$: se pelo contrário funciona com carga capacitiva, a tensão nos bornes passa em atraso com respeito à corrente e fica medida, portanto, pelos segmentos, como por exemplo $\overline{BC_3}$, e a queda de tensão correspondente é $\overline{C_3D_3}$.

Evidencia-se que no funcionamento com carga capacitiva, a queda de tensão diminui com o aumentar da defasagem em adiantamento da corrente sobre a tensão.

A queda de tensão resulta nula, isto é, a tensão nos bornes secundários do transformador fica a mesma tanto no funcionamento a vazio como no com carga, quando o ponto C passa por M.

Aumentando-se a defasagem em adiantamento da corrente, a tensão nos bornes, com carga, fica maior que a tensão a vazio, isto é, aumentando a carga do transformador a tensão secundária aumenta em lugar de diminuir. O diagrama considerado evidencia, portanto, claramente como varia a queda de tensão do transformador ao variar do fator de potência secundário por uma corrente fornecida constante.

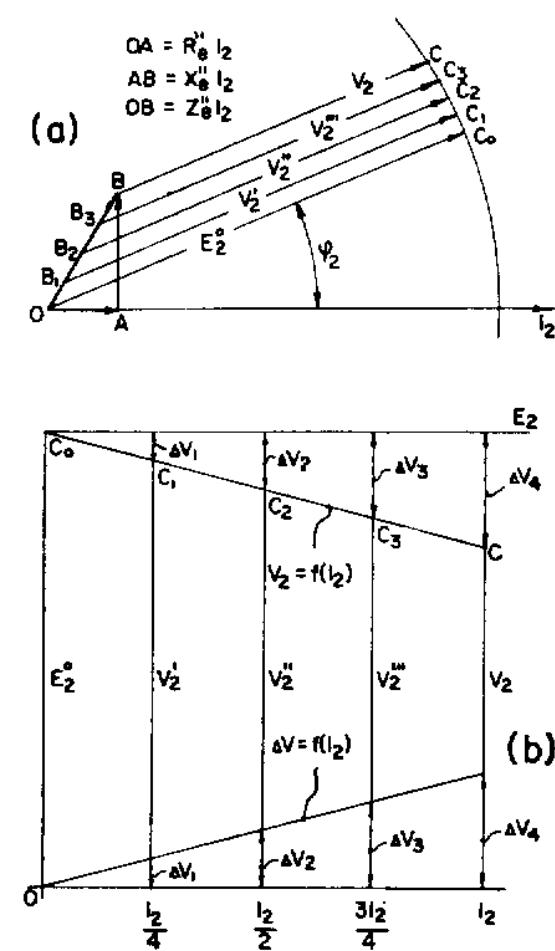
Se pelo contrário interessa determinar como varia a tensão secundária ao variar da corrente fornecida, ficando invariado o fator de potência, pode-se dar ao diagrama de Kapp a disposição indicada na fig. 48 a.

Isto é, constrói-se o triângulo fundamental (OAB) pela corrente secundária de plena carga, é claro que — se dividindo, a hipotenusa OB, por exemplo, em quatro partes iguais, os vetores OB₁, OB₂, OB₃ representam a queda correspondente respectivamente a um quarto de carga, a metade e aos três quartos da carga. Se a defasagem externa fica constantemente igual a ϕ_2 , a tensão secundária resulta representada correspondentemente pelos vetores B₁C₁, B₂C₂ etc.

As tensões secundárias assim obtidas podem ser traçadas como ordenadas num diagrama que tem por abscissas as respectivas correntes fornecidas, fig. 48b. A curva assim obtida constitui a característica externa do transformador, relativa ao funcionamento com carga indutiva com fator de potência constante.

Fig. 48

Característica externa de um transformador com fator de potência ($\cos\phi_2$) constante



Característica externa de um transformador

com fator de potência ($\cos\phi_2$) constante

As tensões secundárias assim obtidas podem ser traçadas como ordenadas num diagrama que tem por abscissas as respectivas correntes fornecidas, fig. 48b. A curva assim obtida constitui a característica externa do transformador, relativa ao funcionamento com carga indutiva com fator de potência constante.

Os segmentos compreendidos entre esta curva e a horizontal que tem por ordenada a tensão a vazio E^0_2 representam as quedas de tensão industrial que correspondem aos diferentes valores da corrente fornecida, representados sobre as abscissas. O diagrama da fig. 48 permite evidentemente determinar as características externas relativas a qualquer fator de potência, variando simplesmente a direção em que estão traçados os vetores que representam as tensões secundárias com respeito à direção do vetor que representa a corrente I_2 . Diminuindo o ângulo de atraso ϕ_2 da corrente, as características externas resultam menos

inclinadas. Para cargas capacitivas, quando a defasagem em adiantamento da corrente supera determinado valor, obtém-se características crescentes.

Transportando os valores das quedas de tensão ΔV_1 ; ΔV_2 ; ΔV_3 etc. como ordenadas, no diagrama da fig. 48, obtém-se a curva $\Delta V = f(I_2)$ que é chamada característica de regulação. Na linguagem prática a queda de tensão industrial ΔV , referida à corrente de plena carga, é chamada de *regulação* sendo expressa em percentagem da tensão secundária nominal.

22) FÓRMULAS PRÁTICAS PARA O CÁLCULO DIRETO DA QUEDA DE TENSÃO INDUSTRIAL (REGULAÇÃO)

Os diagramas considerados põem claramente em relevo como varia a tensão secundária do transformador ao variar da carga, mas não permitem, praticamente, obter resultados aproximados, pois as dimensões do triângulo fundamental do transformador são sempre muito pequenas com relação à tensão. (Observe-se que a hipotenusa do triângulo fundamental corresponde à tensão de curto-círcuito do transformador reduzida ao secundário e é igual a 5% ou 10% da tensão normal de exercício: isto quer dizer que sobre o diagrama de Kapp a impedância do triângulo fundamental pode resultar praticamente de 5 ou 10 centésimos do raio da circunferência que representa a tensão a vazio).

Pela determinação efetiva da tensão secundária com carga é, portanto, necessário aplicar-se o cálculo analítico. Este pode ser deduzido diretamente do conhecido diagrama do circuito equivalente secundário reproduzido na fig. 49.

Do diagrama resulta:

$$(E^o_2)^2 = \sqrt{(V_2 \cos \varphi_2 + R''_e I_2)^2 + (V_2 \sin \varphi_2 + X''_e I_2)^2}$$

Resolvendo-se esta equação, considerando V_2 como incógnita, obter-se-á a tensão secundária em função da corrente fornecida I_2 e do ângulo de defasagem φ_2 .

Conhecida a tensão V_2 , a diferença aritmética $\Delta V = E^o_2 - V_2$ fornece a queda de tensão industrial, nas condições de carga consideradas.

Esta queda de tensão pode ser avaliada por outro processo, considerando-se o diagrama vetorial reproduzido na fig. 50. Traçando-se o arco de circunferência com o centro O e raio E^o_2 , a diferença

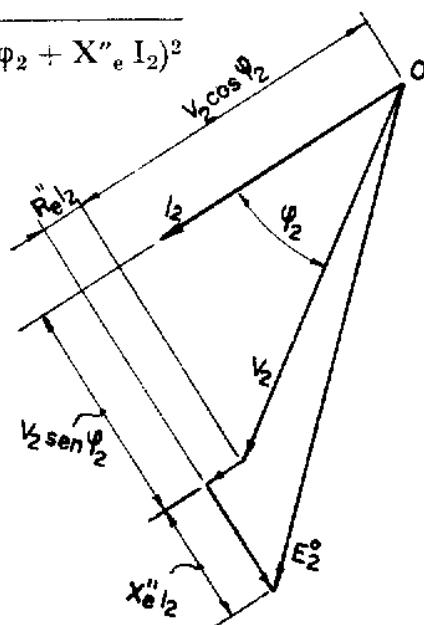


Fig. 49

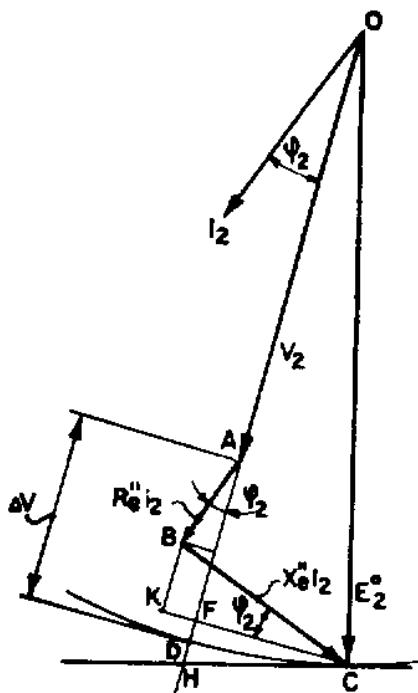


Fig. 50

ótima aproximação este pode ser considerado igual à metade do segmento FH, o qual é definido pela proporção FH: CF = CF: OF pode-se considerar então

$$FD = \sim \frac{1}{2} FH = \frac{1}{2} \frac{CF^2}{OF}$$

Da figura resulta que:

$$CF = CK - FK, \text{ isto é } CF = X''_e I_2 \cos\phi_2 - R''_e \sin\phi_2.$$

De outro lado, dado o significado corretivo deste cálculo, o segmento OF pode ser substituído pelo segmento OD = E_2^o e assim sendo pode-se escrever:

$$FD = \sim \frac{1}{2} \frac{(X''_e I_2 \cos\phi_2 - R''_e I_2 \sin\phi_2)^2}{E_2^o}$$

O valor da queda de tensão é fornecido pela expressão:

$$\Delta V = R''_e I_2 \cos\phi_2 + X''_e I_2 \sin\phi_2 + \frac{1}{2} \frac{(X''_e I_2 \cos\phi_2 - R''_e I_2 \sin\phi_2)^2}{E_2^o}$$

aritmética entre E_2^o e V_2 é representada pelo segmento AD: o cálculo da queda de tensão ΔV reduz-se, portanto, ao cálculo do comprimento deste segmento.

Como primeira aproximação pode-se desprezar o pequeno segmento FD para considerar $\Delta V \approx AF$. Da fig. 50 obtém-se

$$AF = R''_e I_2 \cos\phi_2 + X''_e I_2 \sin\phi_2$$

Para um cálculo rápido um tanto aproximado da queda de tensão industrial, pode-se então empregar à simples fórmula

$$\Delta V \approx R''_e I_2 \cos\phi_2 + X''_e \sin\phi_2$$

Para se ter o valor exato da queda de tensão é preciso juntar ao calculado o valor correspondente ao pequeno segmento FD: com

Querendo-se exprimir esta queda em percentagem da tensão a vazio obtém-se:

$$\epsilon \% = 100 \frac{\frac{E_2^o - V_2}{E_2^o} \Delta V}{\frac{R''_e I_2 \cos\phi_2 + X''_e I_2 \sin\phi_2}{2} \frac{(X''_e I_2 \cos\phi_2 - R''_e I_2 \sin\phi_2)^2}{E_2^o}}$$

$$\epsilon \% = 100 \frac{\frac{I_2}{E_2^o} (R''_e \cos\phi_2 + X''_e \sin\phi_2) + 50 \frac{I_2^2}{(E_2^o)^2} (X''_e \cos\phi_2 - R''_e \sin\phi_2)^2}{(R''_e \cos\phi_2 + X''_e \sin\phi_2) + 50 \frac{I_2^2}{(E_2^o)^2} (X''_e \cos\phi_2 - R''_e \sin\phi_2)^2}$$

A mesma queda em percentagem da tensão pode ser expressa também em função da tensão e da corrente primária V_1 e I_1 , empregando-se em tal caso pelo cálculo a resistência e a reatância equivalentes primárias R'_e e X'_e e se obterá

$$\epsilon \% = 100 \frac{\frac{I_1}{V_1} (R'_e \cos\phi_2 + X'_e \sin\phi_2) + 50 \frac{I_1^2}{V_1^2} (X'_e \cos\phi_2 - R'_e \sin\phi_2)^2}{(R'_e \cos\phi_2 + X'_e \sin\phi_2) + 50 \frac{I_1^2}{V_1^2} (X'_e \cos\phi_2 - R'_e \sin\phi_2)^2}$$

Observando-se que os termos $R'_e I_1$ e $X'_e I_1$ representam respectivamente as componentes ativas e reativas da tensão de curto-circuito $V_{1cc} = Z'_e I_1$, pode-se escrever também $R'_e I_1 = V_{1cc} \cos\phi_{1cc}$ e $X'_e I_1 = V_{1cc} \sin\phi_{1cc}$.

A queda de tensão pode ser expressa, assim, diretamente em função dos elementos deduzidos no ensaio de curto-circuito do transformador, por meio da equação

$$\epsilon \% = 100 \frac{\frac{V_{1cc}}{V_1} (\cos\phi_{1cc} \cos\phi_2 + \sin\phi_{1cc} \sin\phi_2) + 50 \left(\frac{V_{1cc}}{V_1} \right)^2 (\sin\phi_{1cc} \cos\phi_2 + \cos\phi_{1cc} \sin\phi_2)^2}{(\cos\phi_{1cc} \cos\phi_2 + \sin\phi_{1cc} \sin\phi_2) + 50 \left(\frac{V_{1cc}}{V_1} \right)^2 (\sin\phi_{1cc} \cos\phi_2 - \cos\phi_{1cc} \sin\phi_2)^2}$$

Nesta fórmula pode-se ainda observar que o termo $\left(100 \frac{V_{1cc}}{V_1} \right)$ representa o valor percentual da tensão de curto-circuito com respeito à tensão de exercício: pondo-se então $100 \frac{V_{1cc}}{V_1} = V_{cc} \%$ e desprezando-

se os índices numéricos que não são mais necessários, a queda percentual de tensão pode ser expressa pela fórmula

$$\epsilon \% = (V_{ce}\%) \cdot (\cos\phi_{ce} \cdot \cos\phi + \sin\phi_{ce} \cdot \sin\phi) + \frac{(V_{ce}\%)^2}{200} \\ (\sin\phi_{ce} \cos\phi - \cos\phi_{ce} \sin\phi)^2$$

na qual $\cos\phi$ representa o fator de potência do circuito alimentado pelo transformador e $\cos\phi_{ce}$ é o fator de potência de curto-círcuito.

A título de exemplo, se um transformador tem uma tensão de curto-círcuito de 8% da tensão de exercício, isto é, $V_{ce}\% = 8$, com um fator de potência de curto-círcuito $\cos\phi_{ce} = 0,2$ ($\sin\phi_{ce} \approx 0,98$), quando este funciona com um fator de potência secundária $\cos\phi = 0,8$, ($\sin\phi = 0,6$), a queda de tensão na passagem do funcionamento a vazio para o de plena carga resulta

$$\epsilon \% = 8(0,2 \cdot 0,8 + 0,98 \cdot 0,6) + \frac{8^2}{200} (0,98 \cdot 0,8 - 0,2 \cdot 0,6)^2 = 5,984 + 0,141 = 6,125\%$$

O exemplo evidencia claramente que o segundo termo da fórmula é desprezível com respeito ao primeiro.

O valor percentual da tensão de curto-círcuito relativo à corrente de plena carga é freqüentemente indicado pelo construtor sobre a placa do transformador. Para correntes menores que a de plena carga, a tensão de curto-círcuito reduz-se em proporção. O fator de potência de curto-círcuito que está também indicado na placa é, pelo contrário, independente da corrente e, portanto, fica constante.

A queda de tensão industrial, expressa em percentagem, denominada *regulação*, pode também ser calculada com base na impedância equivalente do transformador, conforme indicado a seguir:

$$\epsilon \% = a \left[\% I \cdot R \cdot \cos\phi + \% I \cdot X \cdot \sin\phi + \frac{(\% I \cdot X \cdot \cos\phi - \% I \cdot R \cdot \sin\phi)^2}{200} \right]$$

nesta fórmula:

a = fator de carga

$\% I \cdot R$ = componente resistiva da impedância em %

$\% I \cdot X$ = componente reativa da impedância em %

$\cos\phi$ = fator de potência da carga do transformador

$$\sin\phi = \sqrt{1 - \cos^2\phi}$$

Os valores % I.R e % I.X são calculados por meio dos dados fornecidos pelas tabelas, isto é, por meio dos valores, respectivamente, das perdas no cobre e das perdas no ferro, isto é:

$$\% \text{ I.R} = \frac{\text{Perdas no cobre} \cdot 100}{\text{Potência nominal do transf.}}$$

$$\% \text{ I.X} = \sqrt{(\% \text{ I.Z})^2 - (\% \text{ I.R})^2}$$

% I.Z é a tensão de curto-círcuito, chamada também de tensão de impedância.

A título de exemplo será calculada a *regulação* de um transformador de 150 kVA, que possui perdas no cobre iguais a 2200 watts e a *tensão de impedância* 3,5%

- a) para $\cos\phi = 1$ e carga normal
- b) para $\cos\phi = 0,8$ e 75% da carga.

No primeiro caso $\cos\phi = 1$ e por conseguinte $\sin\phi = 0$, o fator de carga $c = 1$.

$$\% \text{ I.R} = \frac{2200 \cdot 100}{150\,000} = 1,46$$

$$\% \text{ I.X} = \sqrt{3,5^2 - 1,46^2} = 3,8$$

$$\epsilon \% = 1,46 + \frac{3,8^2}{200} = 1,53$$

No segundo caso: $\cos\phi = 0,8$; $\sin\phi = 0,6$; $c = 0,75$

$$\epsilon \% = 0,75 \left[1,46 \cdot 0,8 + 3,8 \cdot 0,6 + \frac{(3,8 \cdot 0,8 + 1,46 \cdot 0,6)^2}{200} \right] = 2,64$$

23) PERDAS NO COBRE

As perdas de potência que se verificam nos transformadores se compõem como já foi observado precedentemente pelas perdas por efeito Joule e as perdas no ferro. As perdas por efeito Joule são devidas à resistência ôhmica dos enrolamentos e chamadas perdas no cobre. As perdas no ferro são devidas às perdas por histerese e correntes parasitas.

Para um transformador monofásico, as perdas no cobre são dadas, como é sabido, pela relação:

$$W_1 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$

sendo R_1 e R_2 as resistências primárias e secundárias e I_1 , I_2 , as correntes correspondentes: podendo-se considerar praticamente (desprezando-se a corrente a vazio) $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{m}$

pode-se escrever também:

$$W_1 = \left(\frac{R_1}{m^2} + R_2 \right) I_2^2 = R''_e I_2^2$$

sendo R''_e a resistência equivalente secundária do transformador. Considerando-se a resistência equivalente primária temos:

$$R'_e = R_1 + m^2 R_2$$

e, portanto, $W_1 = R'_e I_1^2$

Aumentando a resistência com a temperatura, o cálculo das perdas no cobre deve ser executado com as resistências aquecidas à temperatura de regime. Pela determinação destas perdas podem-se medir separadamente as resistências R_1 e R_2 para aplicar as fórmulas já apresentadas, ou, pelo contrário, medir a potência absorvida pelo transformador no ensaio de curto-círcuito para determinar, com base nesta, diretamente o valor da resistência equivalente primária ou secundária. A experiência demonstra que os resultados não coincidem, pois as perdas no cobre obtidas no ensaio de curto-círcuito resultam sensivelmente maiores que o valor que se obtém executando o cálculo por meio das resistências R_1 e R_2 medidas separadamente. O fato é devido às perdas no ferro que, embora mínimas, não deixam de existir, e ao efeito pelicular ou "skin effect". O efeito pelicular é devido à distribuição desuniforme das correntes na seção dos condutores, o que traz como consequência uma resistência ôhmica superior àquela que os mesmos apresentam à passagem da corrente contínua. Resulta, portanto, que a determinação da resistência equivalente do transformador fornece por meio da prova de curto-círcuito um resultado mais preciso que a medida separada das duas resistências primárias e secundárias.

Pelos transformadores trifásicos com carga equilibrada, indicando-se com R_1 e R_2 as resistências de cada fase primária e secundária e com I_1 e I_2 as respectivas correntes, as perdas no cobre são dadas evidentemente pelas expressões

$$W_1 = 3(R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \text{ ou } W_1 = 3R''_e I_2^2$$

As perdas no cobre variam ao variar da carga do transformador e precisamente em proporção ao quadrado da corrente fornecida: no funcionamento a vazio, as perdas produzidas pela corrente a vazio verificam-se somente na resistência primária, tornando-se, portanto, desprezíveis.

O cálculo das perdas no cobre resulta muito simplificado quando for referido ao peso do cobre e à perda específica, isto é, à perda em watt por cada kg de material.

As perdas por efeito Joule, num condutor com comprimento de 1 metro e seção de $S \text{ mm}^2$, são expressas por:

$$W_{cu} = I^2 R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot 1}{S}$$

O peso de um condutor de cobre, cujo comprimento é 1 metro e cuja seção é $S \text{ mm}^2$, resulta expresso em kg pela seguinte fórmula:

$$P_{cu} = 8,9 \cdot 1 \cdot S \cdot 10^{-3}$$

O fator 8,9 representa o peso específico do cobre.

A perda específica no cobre resulta:

$$\begin{aligned} \omega_{cu} &= \frac{W_{cu}}{P_{cu}} = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot 1}{S} \cdot \frac{10^3}{8,9 \cdot 1 \cdot S} = \frac{I^2}{S^2} \cdot \frac{\rho}{8,9} \cdot 10^3 = \\ &= d^2 \cdot \frac{\rho}{8,9} \cdot 10^3 \text{ Watts/kg} \end{aligned}$$

d = densidade de corrente em Amp/mm²

ρ = resistividade que para o cobre recozido a 75 °C resulta igual a 0,0216 ohms/m/mm².

Simplificando resulta:

$$W_{cu} = 2,43 \cdot d^2 \cdot P_{cu}$$

24) RENDIMENTO DO TRANSFORMADOR

O rendimento de um transformador é definido como a relação entre a potência elétrica W_2 fornecida pelo secundário e a potência elétrica W_1 correspondentemente absorvida pelo primário.

$$\mu = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_F}{W_a} = \frac{W_F}{W_F + W_J + W_t}$$

isto é, indicando-se a potência absorvida como sendo a potência fornecida mais a potência perdida (efeito Joule e perdas no ferro).

Para um transformador monofásico a potência fornecida pelo secundário é expressa por $W_2 = V_2 I_2 \cos\phi_2$, sendo V_2 , I_2 e $\cos\phi_2$ respectivamente a tensão, a corrente e o fator de potência da linha alimentada pelo secundário.

A potência primária é fornecida analogamente por $W_1 = V_1 I_1 \cos\phi_1$, sendo V_1 , I_1 e $\cos\phi_1$, a tensão, a corrente e o fator de potência medidos na linha de alimentação do primário. Correspondentemente, o rendimento do transformador é expresso por:

$$\mu = \frac{V_2 I_2 \cos\phi_2}{V_1 I_1 \cos\phi_1}$$

Pode-se também escrever que

$$W_1 = W_2 + W_t + W_i = V_2 I_2 \cos\phi_2 + W_o + R''_e I_2^2$$

o rendimento então resulta

$$\mu = \frac{V_2 I_2 \cos\phi_2}{V_2 I_2 \cos\phi_2 + W_o + R''_e I_2^2}$$

Esta fórmula permite calcular o rendimento em todas as condições da carga que se pretender considerar, uma vez que já foram determinadas a potência absorvida a vazio e a resistência secundária equivalente R''_e .

Se o transformador é trifásico, indicando-se com V_2 , I_2 e $\cos\phi_2$, a tensão corrente e o fator de potência relativos a cada fase, obtendo-se

$$\mu = \frac{3V_2 I_2 \cos\phi_2}{3V_2 I_2 \cos\phi_2 + W_o + 3R''_e I_2^2}$$

W_o é a potência absorvida a vazio e R''_e é a resistência equivalente secundária de uma fase. Esta expressão pode ser escrita também

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{W_o + 3R''_e I_2^2}{3V_2 I_2 \cos\phi_2}}$$

Esta fórmula evidencia claramente que por uma determinada tensão e corrente secundária, o rendimento resulta tanto menor quanto menor

for o fator de potência; para um determinado fator de potência, e suposta a tensão constante, o rendimento varia com o variar da corrente fornecida.

O rendimento em % pode ser também, calculado pela seguinte fórmula:

$$\mu\% = 100 - \frac{W_{fe} + a \cdot W_{cu}}{a \cdot W_2 \cdot \cos\phi_2 + W_{fe} + a \cdot W_{cu}} \cdot 100$$

Nesta fórmula

W_2 = Potência nominal em kVA

W_{fe} = Perdas no ferro em kW

W_{cu} = Perdas no cobre com carga normal

$\cos\phi$ = Fator de potência

a = Fator de carga

Como exemplo, calcula-se o rendimento de um transformador de 500 kVA que possui: perdas no cobre = 6,4 kW; perdas no ferro = 1,7 kW.

a → para plena carga com $\cos\phi = 1$

b → para plena carga com $\cos\phi = 0,8$

c → para 75% da carga com $\cos\phi = 0,8$

No primeiro caso: a = 1; $\cos\phi = 1$

$$\mu\% = 100 - \frac{1,7 + 6,4}{500 + 1,7 + 6,4} \cdot 100 = 98,4\%$$

No segundo caso: a = 1; $\cos\phi = 0,8$

$$\mu\% = 100 - \frac{1,7 + 6,4}{500 \cdot 0,8 + 1,7 + 6,4} \cdot 100 = 98,1\%$$

No terceiro caso: a = 0,75; $\cos\phi = 0,8$

$$\mu\% = 100 - \frac{1,7 + 0,75 \cdot 6,4}{0,75 \cdot 500 \cdot 0,8 + 1,7 + 0,75 \cdot 6,4} \cdot 100 = 97,88\%$$

CAPÍTULO II

25) CONSIDERAÇÕES E DADOS PARA O PROJETO DOS TRANSFORMADORES DE PEQUENA POTÊNCIA MONOFÁSICOS

a) *Condutores, isolamento e disposição das bobinas*

Os condutores empregados nos transformadores são de cobre, isolados com esmalte ou algodão.

O esmalte ocupa menor espaço que o algodão, mas é mais caro. As características básicas do esmalte são: resistência ao calor e elasticidade, pois deve resistir a temperaturas de aproximadamente 80° C e deve manter seu poder isolante mesmo quando o condutor é dobrado com raios de curvatura pequenos.

Para pequenos transformadores usam-se fios redondos até o n.º 10 (AWG), além do qual se prefere o emprego de condutores quadrados ou retangulares. Em certos casos, para tornar o enrolamento de mais fácil execução, substituem-se os condutores de elevada seção por 2 (dois) condutores agrupados em paralelo.

O carretel sobre o qual são enroladas as bobinas é constituído por cartolina isolante ou prespann, colado em várias camadas até alcançar a espessura desejada. Sua forma, conforme fig. 51, é obtida por meio de molde de madeira. A colagem das várias camadas de cartolina ou prespann é feita rapidamente por meio de calor (ferro de soldar), desde que uma das faces da cartolina seja previamente recoberta com goma arábica.

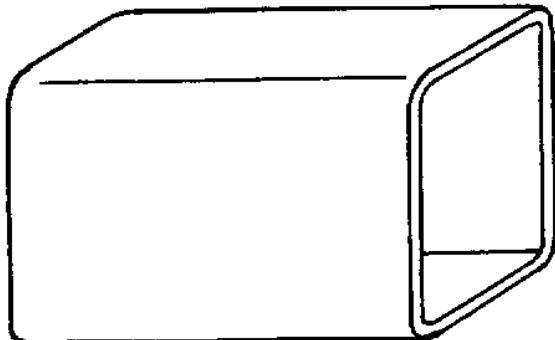


Fig. 51

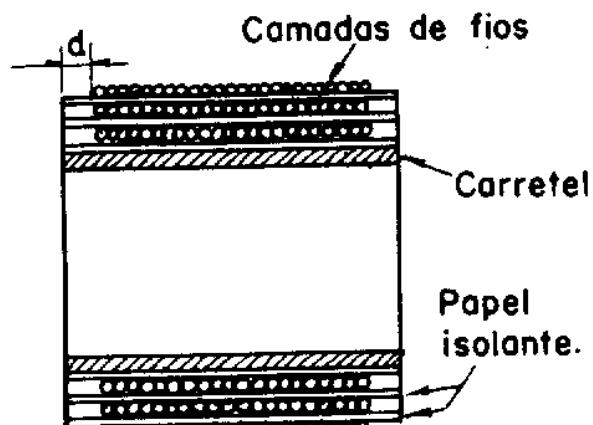


Fig. 52

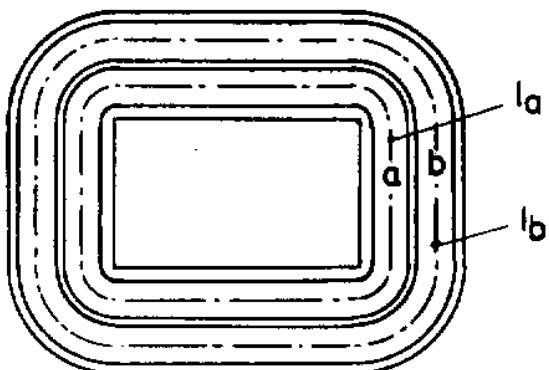


Fig. 53

O enrolamento das bobinas sobre o carretel se processa conforme indicado na fig. 52, isto é, entre uma camada e outra sucessiva há uma folha de papel isolante. A fim de garantir o isolamento das bobinas, os fios não são enrolados até a extremidade do carretel, ficando entre esta e o término da camada uma distância d que depende das dimensões do transformador.

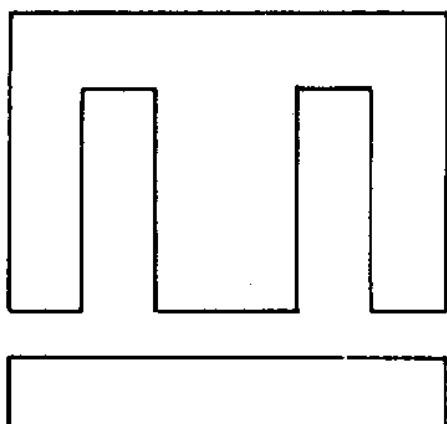


Fig. 54

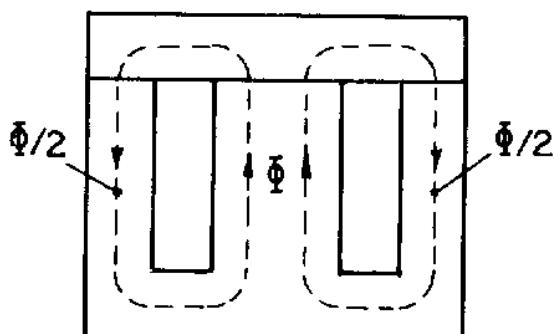


Fig. 55

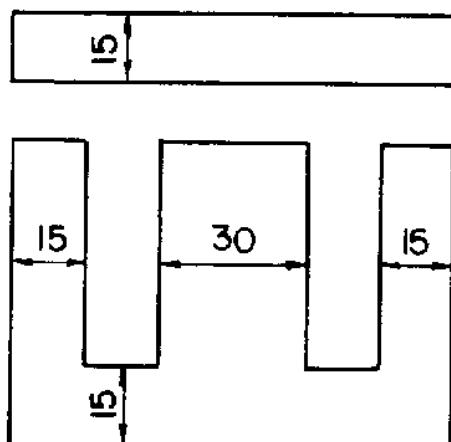


Fig. 56

A separação entre a bobina primária e a bobina secundária é feita com uma camada de cartolina grossa ou várias camadas de cartolina fina, com espessura proporcional à tensão do enrolamento A.T.

Ao se executar o enrolamento das bobinas é aconselhável enrolar primeiro a bobina A.T., pois esta, sendo de fio fino, se adapta mais às curvas apertadas nos vértices do carretel, conforme fig. 53. Além disso a bobina a , por estar mais próxima do carretel, possui um comprimento médio l_a menor que l_b e por conseguinte terá menor peso. Esta particularidade de construção é importante, pois o fio fino, por quilo, é mais caro que o fio grosso.

b) Lâminas padronizadas

Em geral o núcleo dos pequenos transformadores é feito com lâminas padronizadas, chamadas de E e I, em virtude de seu formato especial, conforme fig. 54.

Nestas, conforme a fig. 55 mostra, o fluxo magnético Φ , gerado no núcleo central, divide-se em duas partes, pelo que nas colunas laterais existe a metade do fluxo que age no núcleo central. Pela razão exposta, tanto as colunas laterais como as travessas (superior e inferior) possuem espessura correspondente à metade da espessura do núcleo central.

Se a espessura do núcleo central for 30 mm, a espessura das colu-

nas e das travessas é de 15 mm, conforme indica a fig. 56.

Todas as dimensões das lâminas E e I são em função da largura do tronco central, conforme fig. 57, e sua montagem na bobina é feita conforme indica a fig. 58, em posições alternadas, o que dá ao núcleo mais resistência mecânica e menor relutância magnética.

O dimensionamento das lâminas E e I, conforme indica a fig. 57, tem por finalidade aproveitar ao máximo as chapas brutas.

A fig. 59 mostra como é estampada a chapa, evidenciando que dos dois furos são retiradas as duas lâminas I com as dimensões exatas para seu emprego, ou seja ($3a \times 0,5a$). Dando-se em seguida um corte no meio da lâmina, conforme fig. 60, ter-se-ão duas lâminas E com as dimensões padronizadas. Do exposto resulta que de cada lâmina estampada, da fig. 59, se obtêm duas lâminas E e duas lâminas I, sem nenhuma perda de material. Este aproveitamento total da chapa bruta justifica o dimensionamento das lâminas padronizadas.

Uma grandeza característica das lâminas dos transformadores é a área da "janela", pois, como se verá mais tarde, dela dependerá o número de espiras e a seção dos condutores que irão constituir a bobina do transformador.

A janela possui as dimensões indicadas na fig. 61, sendo sua área calculada pela seguinte fórmula:

$$S_j = 0,5a \cdot 1,5a = 0,75a^2$$

Assim sendo, na lâmina cujo tronco central tem $a = 30$ mm, a área da janela será:

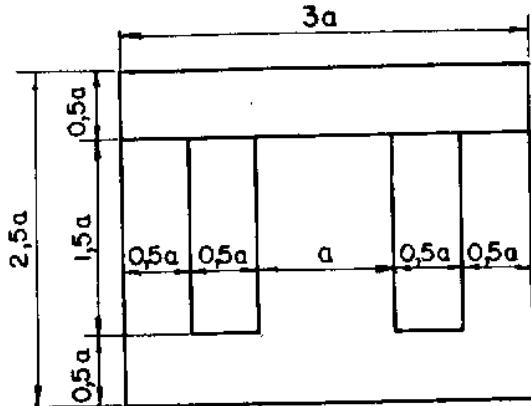


Fig. 57

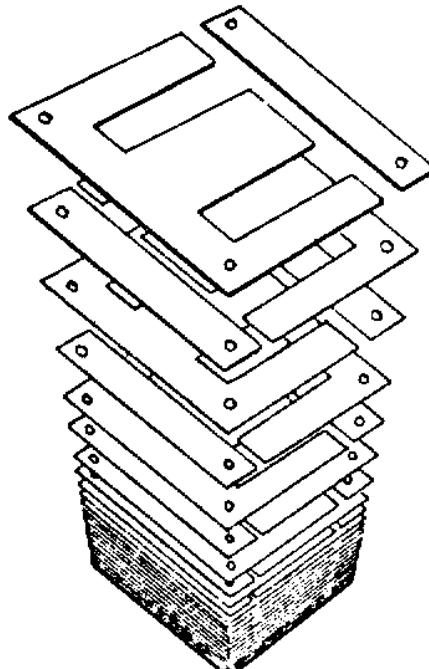


Fig. 58

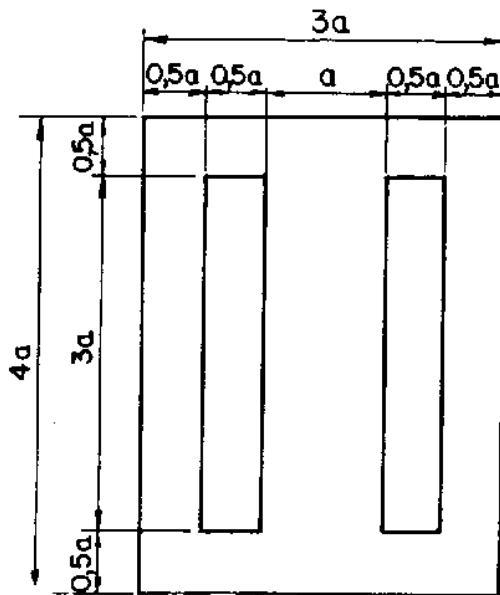


Fig. 59

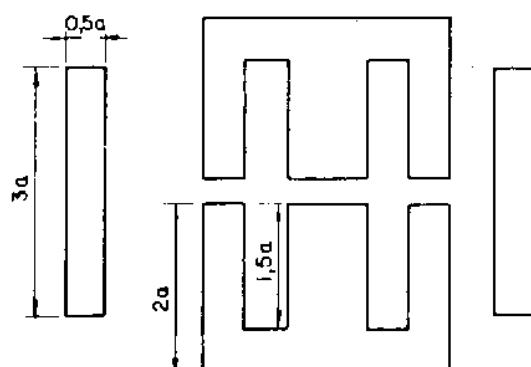


Fig. 60

$$S_j = 0,75a^2 = 0,75 \cdot 30^2 = 675 \text{ mm}^2$$

Outra grandeza característica das lâminas é que vale a pena registrar é o peso de cada centímetro de espessura do núcleo por elas constituído. Esta grandeza, quando registrada em tabela, para os diferentes tipos de lâminas, facilita enormemente o cálculo do peso das lâminas possuídas por um transformador.

O cálculo do peso do núcleo é feito da seguinte forma:

Primeiro se avalia a área frontal que é dada por:

$$A = 3a \cdot 2,5a - 2 \cdot 1,5a \cdot 0,5a = \\ = 7,5a^2 - 1,5a^2 = 6a^2$$

Sendo a espessura do núcleo 1 cm, a espessura real do ferro é 10% menor, pois as lâminas são separadas por uma camada de óxido, podendo ser considerada 0,9 cm.

O volume do núcleo resulta:

$$V = A \cdot \text{esp.} = 6a^2 \cdot 0,9 = 5,4a^2$$

O peso em gramas é obtido multiplicando-se o volume em centímetros cúbicos pelo peso específico do ferro que é 7,8, resultando:

$$\text{Peso de 1 cm de núcleo} = 5,4a^2 \cdot 7,8 = \sim 42,2a^2$$

O peso é expresso em gramas se a for indicado em centímetros.

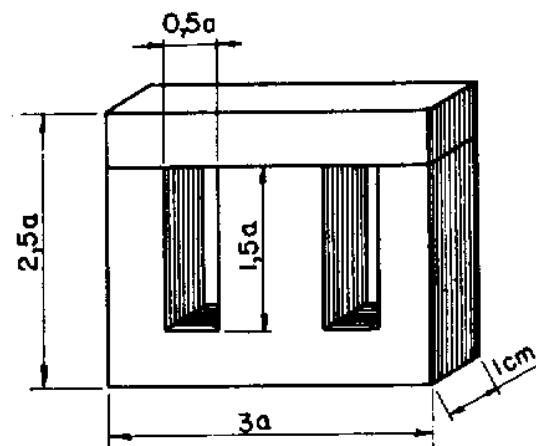


Fig. 62

Um centímetro de núcleo constituído com lâminas de 30 mm, resulta:

$$P/\text{cm} = 42,2 \cdot 3^2 = 42,2 \cdot 9 = 379,8 \text{ g} = \sim 0,380 \text{ kg.}$$

As lâminas normais para transformadores são classificadas por número, sendo as mais comuns as classificadas de 0 a 6.

Na tabela da fig. 63 estão indicadas, para todos os tipos de lâminas as grandezas características, isto é, número de ordem; largura da coluna central em mm; área da janela em mm^2 e peso por centímetro de comprimento do núcleo. Para transformadores com potência superior a 800 VA não é mais possível usar lâminas padronizadas, pois deveriam ser usados núcleos exageradamente compridos, o que torna difícil a fabricação das bobinas e por conseguinte antieconômico o transformador.

Algumas fábricas, para solucionar este caso, costumam usar lâminas especiais, obtidas com a mesma matriz das lâminas padronizadas, mas cortadas da forma indicada na fig. 64.

Esse tipo de lâmina é chamado de "Lâmina Comprida".

Na tabela da fig. 65 estão indicadas, para os dois tipos mais usados de "Lâminas Compridas", as grandezas características, isto é, número de ordem; largura da coluna central em mm; área da janela em mm^2 e peso por centímetro de comprimento do núcleo.

c) Dados para o cálculo

Em geral os valores fornecidos para o cálculo de um transformador são:

W_2 = Potência de saída ou potência secundária, medida em VA.

V_2 = Tensão de saída ou tensão secundária, medida em volts.

V_1 = Tensão de entrada ou tensão primária, medida em volts.

<i>Lâminas Padronizadas</i>			
<i>N.^o</i>	<i>a cm</i>	<i>Seção da Janela mm^2</i>	<i>Peso do núcleo kg/cm</i>
0	1,5	168	0,095
1	2	300	0,170
2	2,5	468	0,273
3	3	675	0,380
4	3,5	900	0,516
5	4	1200	0,674
6	5	1880	1,053

Fig. 63

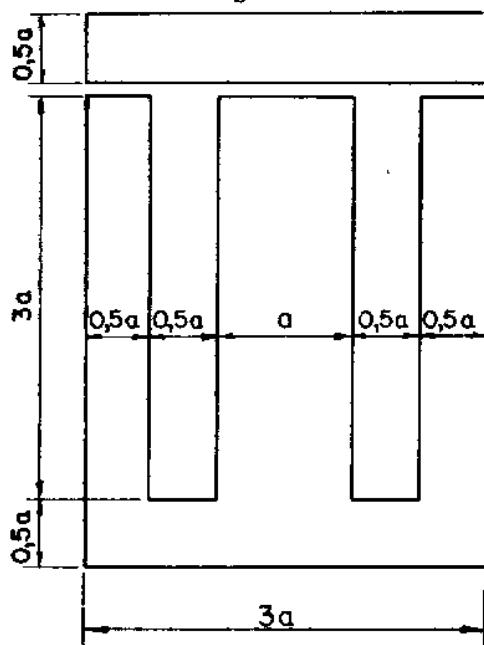


Fig. 64

<i>Lâminas Compridas</i>			
<i>N.^o</i>	<i>a cm</i>	<i>Seção da Janela mm^2</i>	<i>Peso do núcleo kg/cm</i>
5	4	2400	1,000
6	5	3750	1,580

Fig. 65

d) *Cálculo das correntes primárias e secundárias*

A corrente secundária é obtida diretamente pela relação:

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} \text{ expressa em ampères.}$$

Para se calcular a corrente primária é preciso avaliar a potência primária, o que é feito acrescentando-se à potência secundária 10% de seu valor a fim de se terem em consideração as perdas, isto é,

$W_1 = W_2 \cdot 1,1$ expressa em VA de onde resulta

$$I_1 = \frac{W_1}{V_1} \text{ expressa em ampères.}$$

e) *Cálculo da seção dos condutores*

Para se calcular a seção dos condutores é preciso fixar a densidade de corrente. Em geral, com o aumentar do volume do transformador, aumentam as dificuldades de irradiação do calor; por esta razão, é preciso diminuir a densidade de corrente nos condutores ao aumentar da potência do transformador.

Bons resultados são obtidos quando a densidade de corrente é mantida nos limites indicados na tabela da fig. 66.

Fixada a densidade de corrente calcula-se a seção dos condutores através das conhecidas relações:

$$S_1 = \frac{I_1}{d} \text{ em mm}^2 \quad S_2 = \frac{I_2}{d} \text{ em mm}^2$$

f) *Cálculo da seção geométrica do núcleo*

O produto da largura (a) da coluna central do transformador, pelo comprimento (b) do pacote laminado, conforme fig. 67, fornece a seção geométrica do núcleo, isto é,

$$S_g = a \cdot b \text{ (cm}^2\text{)}$$

Esta seção não representa, porém, a seção verdadeira do ferro, ou seja a seção magnética, pois entre uma lâmina e a outra existe uma

POTÊNCIA VA	DENSIDADE DE CORRENTE A/mm ²
500	3
500 até 1000	2,5
1000 até 3000	2

Fig. 66

espessura de material isolante que não toma parte na formação do fluxo. Assim sendo, a seção magnética é obtida deduzindo-se 10% da área definida como seção geométrica, isto é:

$$S_m = \frac{S_g}{1,1} \text{ ou } S_g = 1,1 \cdot S_m$$

g) Cálculo da seção magnética do núcleo

Sabe-se que num circuito elétrico enrolado sobre ferro existe uma relação de dependência entre seção do núcleo magnético e número de espiras dos enrolamentos, isto é, aumentando a primeira, diminuem as últimas e vice-versa.

A escolha de um núcleo muito grande traz o emprego de poucas espiras e, por conseguinte, um aproveitamento não equilibrado do transformador.

Um núcleo pequeno obriga o uso de enrolamento com muitas espiras, o que provavelmente não permite sua entrada na janela do transformador.

O núcleo bem escolhido é aquele que permite o emprego de bobinas que entram justas nas janelas.

Para se calcular o núcleo do transformador é preciso considerarem-se dois fatores básicos, isto é, o tipo de lâminas e o número de circuitos que o transformador possui.

O tipo de lâminas é um fator decisivo, pois pelo mesmo número de ordem a "lâmina comprida" possui a janela com o dobro da superfície da "lâmina padronizada" e, portanto, admite maior quantidade de espiras.

O número dos circuitos do transformador também é importante,

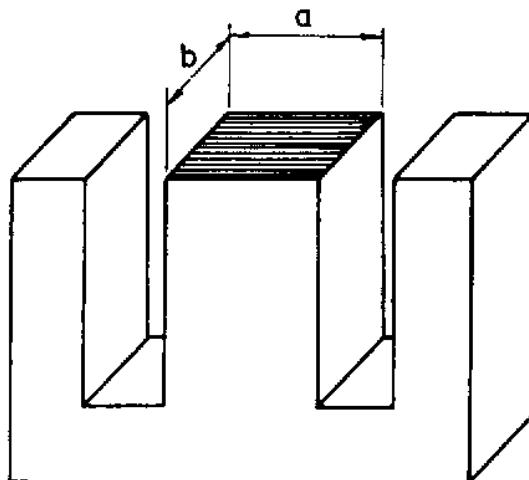


Fig. 67

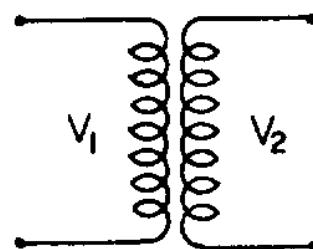


Fig. 68

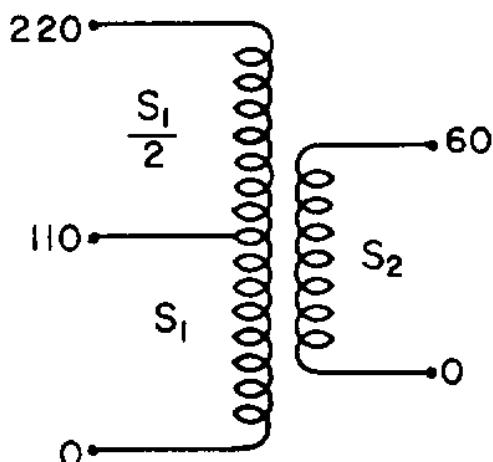


Fig. 69

pois o caso ideal é o do transformador que possui um só circuito primário e um só circuito secundário, conforme fig. 68, pois neste caso todas as espiras são ativas em todas as ocasiões.

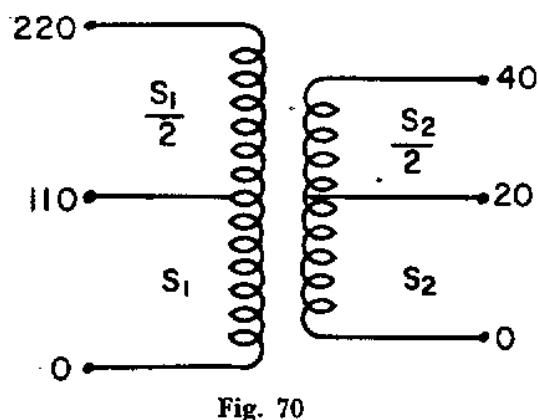
No caso de um transformador com um circuito primário duplo, conforme indica a fig. 69, se o mesmo for alimentado a 110 volts, as espiras entre os bornes 110 V e 220 V ficam inativas. Para que estas espiras entrem na janela é preciso calcular o transformador como se o mesmo fosse destinado a uma potência maior. O circuito entre os bornes 110 V e 220 V deve ser atravessado por uma corrente que é exatamente a metade da que atravessa o circuito entre os bornes 0-110 V.

Quando o transformador for alimentado a 110 V, a potência elétrica transformada ocupa o circuito 0-110 V e o circuito secundário. Nestas condições o proporcionamento do circuito 0-110 V é feito à base da metade da potência do transformador, isto é, $0,5 W_2$.

O circuito 110-220 V possui o mesmo número de espiras que o anterior, mas o seu condutor possui somente metade da seção do condutor empregado no circuito 0-110 V. Assim sendo, o proporcionamento do circuito 110-220 V deve ser relativo à metade da potência do circuito 0-110 V. Como o proporcionamento deste último corresponde a $0,5 W_2$, o proporcionamento do circuito 110-220 V corresponde a $0,25 W_2$.

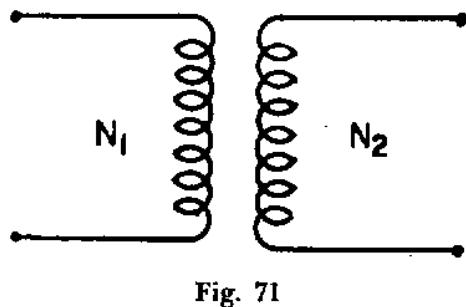
Neste caso o circuito inativo representa um acréscimo do volume do transformador que corresponde a 0,25 da sua potência.

O transformador deve ser calculado como se a potência deste fosse $1,25 W_2$.



No caso de o transformador possuir dois circuitos primários e dois secundários, conforme fig. 70, o mesmo critério aplicado anteriormente leva a considerar o acréscimo total da potência de $0,5 W_2$, isto é, o transformador deverá ser calculado como se sua potência fosse $1,5 W_2$.

Como acima foi exposto, a seção magnética dos transformadores é calculada com as seguintes fórmulas:



- I) Transformador de um primário e um secundário, fig. 71.
- a) Para lâminas padronizadas

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}}$$

onde W_2 = potência secundária em Volt-Ampères; f = freqüência e S_m = seção magnética em centímetros quadrados.

b) Para lâminas compridas

$$S_m = 6 \sqrt{\frac{W_2}{f}}$$

II) Transformador de dois primários e um secundário ou um primário e dois secundários conforme fig. 72

a) Para lâminas padronizadas

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{1,25 W_2}{f}}$$

b) Para lâminas compridas

$$S_m = 6 \sqrt{\frac{1,25 W_2}{f}}$$

III) Transformador de dois primários e dois secundários conforme fig. 73

a) Para lâminas padronizadas

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{1,5 W_2}{f}}$$

b) Para lâminas compridas

$$S_m = 6 \sqrt{\frac{1,5 W_2}{f}}$$

h) Escolha do núcleo

Uma vez calculada a seção magnética do núcleo, calcula-se a seção geométrica $S_g = 1,1 \cdot S_m$

Construtivamente é vantajoso que a forma do núcleo seja próxima da forma quadrada, por isso a largura da coluna central do núcleo é obtida por:

$$a = \sim \sqrt{S_g}$$

Uma vez escolhida a lâmina, determina-se definitivamente

$$S_g = a \cdot b \text{ e } S_m = \frac{S_g}{1,1}$$

i) *Cálculo do número das espiras*

Para o cálculo do número das espiras primárias emprega-se a fórmula

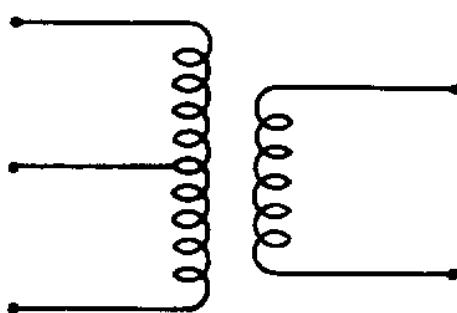


Fig. 72

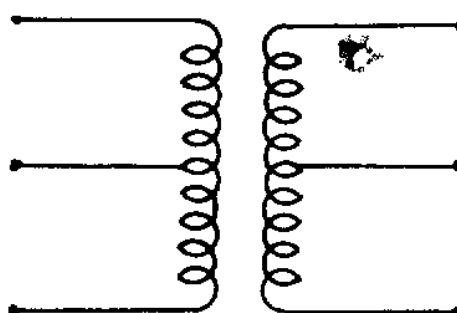


Fig. 73

$$N_1 = \frac{V_1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f}$$

na qual:

N_1 = Número de espiras primárias

V_1 = Tensão do circuito primário em volts

B_M = Indução máxima no ferro (para lâminas de ferro silício, de boa qualidade, com resfriamento natural, $B_M = 11\ 300$)

S_m = Seção magnética em cm^2
 f = freqüência.

A fórmula anterior pode ser escrita na seguinte forma:

$$N_1 = \frac{V_1}{S_m} \cdot \frac{10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot f}$$

I) Para a freqüência de 50 Hz obtém-se

$$N_1 = \frac{V_1}{S_m} \cdot \frac{10^8}{4,44 \cdot 11\ 300 \cdot 50} = V_1 \cdot \frac{40}{S_m}$$

$\frac{40}{S_m}$

A relação $\frac{40}{S_m}$ representa o número de espiras que correspondem à tensão de 1 volt, por isso chama-se "Espiras por volt".

II) Para a freqüência de 60 Hz obtém-se

$$N_1 = \frac{V_1}{S_m} \cdot \frac{10^8}{4,44 \cdot 11\ 300 \cdot 60} = V_1 \cdot \frac{33,5}{S_m}$$

Para o cálculo das espiras secundárias, empregam-se as mesmas fórmulas, aumentando-se porém de 10% o resultado, a fim de compensar a queda da tensão.

j) Possibilidade de execução

Uma vez calculado o número das espiras primárias (N_1) e secundárias (N_2), a seção dos respectivos fios [(S_1) e (S_2)] é possível calcular-se a seção do cobre enrolado.

Para um transformador com um primário e um secundário, esta seção resulta:

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 \text{ em } mm^2$$

Usando-se fio esmaltado para que a bobina possa entrar na janela e a montagem do transformador ser possível é preciso que se verifique:

$$\frac{\text{Seção da janela}}{\text{Seção do cobre}} = \frac{S_j}{S_{cu}} \geq 3$$

Se esta relação for menor que 3 é preciso recalcular o transformador com um núcleo maior.

Vale a pena lembrar que a seção da janela S_j é fornecida pelas tabelas das figs. 63 e 65 correspondente aos tipos de lâmina empregados.

k) Peso do ferro

O peso do núcleo é calculado rapidamente pela fórmula:

$$P_{Fe} = kg/cm.b$$

O peso kg/cm representa o peso em kg de cada centímetro de comprimento do núcleo, sendo fornecido pelas tabelas, conforme figs. 63 e 65, que tratam de lâminas padronizadas ou lâminas compridas.

l) Peso do Cobre

O cálculo do peso total do cobre enrolado, isto é, do primário e do secundário, é feito calculando-se o comprimento da espira média $1m = 2a + 2b + 0,5.a.\pi$ (cm), fig. 74.

Lembrando-se que a seção total do cobre obtida pela fórmula $S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2$ fornece o resultado em mm^2 , sua conversão em cm^2

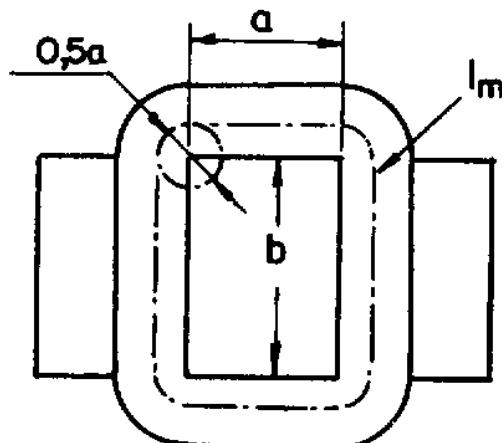


Fig. 74

é feita dividindo-se o resultado por 100, assim sendo, o peso do cobre em gramas resulta:

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot lm \cdot 8,9 \text{ (g)}$$

onde 8,9 representa o peso específico do cobre. Para facilidade de cálculo emprega-se a fórmula aproximada

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot lm \cdot 9$$

26) EXEMPLOS DE CÁLCULOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

EXEMPLO N.^o 1

Transformador monofásico de 50 Hz: $W_2 = 300 \text{ VA}$; $V_2 = 220 \text{ volts}$; $V_1 = 120 \text{ volts}$

Em geral o cálculo obedece à seguinte ordem:

— *Potência primária:* $W_1 = 1,1 \cdot W_2 = 1,1 \cdot 300 = 330 \text{ VA}$

— *Corrente primária:* $I_1 = \frac{W_1}{V_1} = \frac{330}{120} = 2,75 \text{ A}$

— *Corrente secundária:* $I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{300}{220} = 1,36 \text{ A}$

Escolhendo-se a densidade de corrente $d = 3 \text{ A/mm}^2$, obtém-se:

— *Seção do condutor primário:* $S_1 = \frac{I_1}{d} = \frac{2,75}{3} = 0,91 \text{ mm}^2$

usa-se fio n.^o 18 (AWG) cuja seção é $S_1 = 1,04 \text{ mm}^2$

— *Seção do condutor secundário:* $S_2 = \frac{I_2}{d} = \frac{1,36}{3} = 0,45 \text{ mm}^2$

usa-se fio n.^o 20 (AWG) cuja seção é $S_2 = 0,518 \text{ mm}^2$

N.B.: Em ambos os enrolamentos a densidade de corrente resulta inferior à prevista, isto é,

$$d_1 = \frac{I_1}{S_1} = \frac{2,75}{1,04} = 2,64 \text{ A/mm}^2 \text{ e}$$

$$d_2 = \frac{I_2}{S_2} = \frac{1,36}{0,518} = 2,62 \text{ A/mm}^2$$

Para o cálculo da perda no cobre considera-se a densidade média de

$$d = 2,63 \text{ A/mm}^2$$

- *Seção magnética do núcleo:* como o transformador possui um circuito primário e um circuito secundário, emprega-se a fórmula:

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{300}{50}} = 7,5 \sqrt{6} = 7,5 \cdot 2,45 = 18,37 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 18,37 = 20,21 \text{ cm}^2$$

Dimensões do núcleo central 5×4 cm. Emprega-se a lâmina padronizada n.º 6, resultando o comprimento do núcleo de 4 cm. Nestas condições, as dimensões efetivas do núcleo central resultam:

$$S_g = 5 \cdot 4 = 20 \text{ cm}^2; \quad S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{20}{1,1} = \sim 18,2 \text{ cm}^2$$

- *Espiras:*

Sendo a freqüência de 50 Hz, as espiras por volt resultam

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{18,2} = \sim 2,2$$

As espiras do circuito primário cuja tensão é 120 volts, resultam:

$$N_1 = 2,2 V_1 = 2,2 \cdot 120 = 264$$

As espiras secundárias devem ser acrescidas de 10% a fim de compensar as quedas de tensão, isto é:

$$N_2 = 2,2 \cdot V_2 \cdot 1,1 = 2,2 \cdot 220 \cdot 1,1 = 532$$

N.B.: — O esquema do transformador toma a forma indicada na fig. 75.

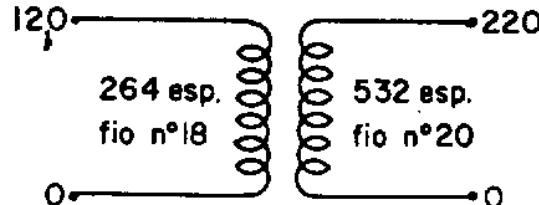


Fig. 75

— *Seção do cobre enrolado:*

$$S_{eu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 264 \cdot 1,04 + 532 \cdot 0,518 = 274,56 + 275,57 = 550 \text{ mm}^2$$

N.B.: Nota-se que a seção total do cobre enrolado no primário é praticamente igual à seção total do cobre enrolado no secundário.

— *Possibilidade de execução:*

Da tabela na fig. 63 observa-se que a lâmina padronizada n.^o 6 tem a janela com $S_j = 1880 \text{ mm}^2$, assim sendo, a relação

$$\frac{S_j}{S_{eu}} = \frac{1880}{550} = 3,4$$

fornecce um resultado maior que 3, o que indica que o transformador é executável.

— *Peso do ferro:*

Da tabela da fig. 63 observa-se que cada centímetro de núcleo feito com a lâmina padronizada n.^o 6 pesa 1,053 kg. Sendo o comprimento do núcleo de 4 cm, o peso do mesmo resulta:

$$P_{fe} = 1,053 \cdot 4 = 4,21 \text{ kg}$$

— *Peso do cobre:*

O comprimento da espira média do cobre resulta:

$$1m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2,5 + 2,4 + 0,5 \cdot 5 \cdot 3,14 = \sim 26 \text{ cm}$$

de onde:

$$P_{eu} = \frac{S_{eu}}{100} \cdot 1m \cdot 9 = \frac{550}{100} \cdot 26 \cdot 9 = 1287 \text{ g} = \sim 1,29 \text{ kg}$$

— *Perdas no ferro:*

O núcleo do transformador pesa 4,21 kg

Conforme parágrafo 10, a perda específica das lâminas Acesita 145, para a indução $B_M = 11\ 300$ e $f = 50$ Hz resulta:

$$\omega_{Fe} = 1,35 \left(\frac{11\ 300}{10\ 000} \right)^2 = 1,72$$

As perdas no núcleo do transformador, conforme parágrafo 10 resultam:

$$W_{Fe} = 1,15 \cdot \omega_{Fe} \cdot P_{eu} = 1,15 \cdot 1,72 \cdot 4,21 = 8,33 \text{ watts}$$

— *Perdas no cobre:*

Foi calculada anteriormente a densidade média de corrente no cobre, resultando de $2,63 \text{ A/mm}^2$. Assim sendo, a perda específica no cobre resulta:

$$\omega_{eu} = 2,43 d^2 = 2,43 \cdot 2,63^2 = 16,8 \text{ W/kg}$$

Sabendo-se que o cobre enrolado pesa $1,38 \text{ kg}$, as perdas no cobre do transformador resultam:

$$W_{eu} = \omega_{eu} \cdot P_{eu} = 16,8 \cdot 1,29 = 21,7 \text{ watts}$$

— *Rendimento do transformador:*

$$\mu = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_2}{W_2 + W_{fe} + W_{eu}} = \frac{300}{300 + 8,33 + 21,7} = \frac{300}{330} \sim 0,91$$

A fim de se anotarem os valores obtidos no cálculo de forma ordenada, serão distribuídos conforme indicado a seguir:

FOLHA DE CÁLCULO DO TRANSFORMADOR DO EXEMPLO N.^o 1

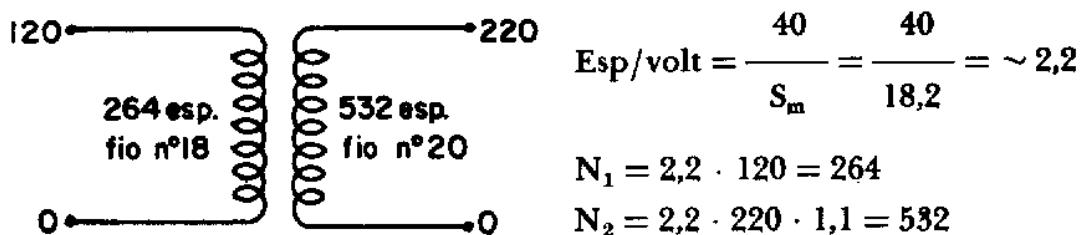
Dados: Transformador monofásico; $f = 50 \text{ Hz}$; $W_2 = 300 \text{ VA}$; $V_2 = 220 \text{ V}$; $V_1 = 120 \text{ V}$

$$\begin{array}{l|l|l|l|l} W_2 = 300 & V_2 = 220 & I_2 = \frac{300}{220} = 1,36 \text{ A} & S_2 = \frac{1,36}{3} = 0,45; \text{ fio } 20 \text{ (} 0,518 \text{ mm}^2 \text{)} \\ \hline W_1 = 330 & V_1 = 120 & I_1 = \frac{330}{120} = 2,75 \text{ A} & S_1 = \frac{2,75}{3} = 0,91; \text{ fio } 18 \text{ (} 1,04 \text{ mm}^2 \text{)} \end{array}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{300}{50}} = 7,5 \sqrt{6} = 18,375 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 18,375 = 20,21 \text{ cm}^2 \text{ usa-se lâmina n.º 6}$$

$$\text{Núcleo central } 5 \times 4; S_g = 20 \text{ cm}^2; S_m = \frac{20}{1,1} = 18,2 \text{ cm}^2$$



$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{18,2} = \sim 2,2$$

$$N_1 = 2,2 \cdot 120 = 264$$

$$N_2 = 2,2 \cdot 220 \cdot 1,1 = 532$$

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 264 \cdot 1,04 + \\ + 532 \cdot 0,518 = 274,56 + \\ + 275,57 = 550 \text{ cm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{1880}{550} = 3,4. \text{ O transformador pode ser enrolado.}$$

$$P_{fe} = 1,053 \cdot 4 = 4,21 \text{ kg}$$

$$Im = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 5 + 2 \cdot 4 + 0,5 \cdot 5 \cdot 3,14 = \sim 26 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot Im \cdot 9 = \frac{550}{100} \cdot 26 \cdot 9 = 1287 \text{ g} = \sim 1,29 \text{ kg}$$

$$W_{fe} = 1,15 \cdot 1,72 \cdot 4,21 = 8,33 \text{ watts}$$

$$W_{cu} = 2,43 \cdot d^2 \cdot P_{cu} = 2,43 \cdot 2,63^2 \cdot 1,29 = 21,7 \text{ watts}$$

$$\text{Rendimento} = \frac{300}{300 + 8,33 + 21,7} = \frac{300}{330} = \sim 0,91$$

EXEMPLO N.º 2

Dados: Transformador monofásico: $f = 50 \text{ Hz}$; $W_2 = 1000 \text{ VA}$;
 $V_1 = 220 \text{ V}$; $V_2 = 24 \text{ V}$

$W_2 = 1000$	$V_2 = 24$	$I_2 = \frac{1000}{24} = 41,7 \text{ A}$	$S_2 = \frac{41,7}{2,5} = 16,7$; Fio $2 \times \text{n.º } 8$ ($16,7 \text{ mm}^2$)
$W_1 = 1100$	$V_1 = 220$	$I_1 = \frac{1100}{220} = 5 \text{ A}$	$S_1 = \frac{5}{2,5} = 2$; Fio $\text{n.º } 14$ ($2,08 \text{ mm}^2$)

N.B.: No circuito secundário deveria ser usado o condutor n.º 5 (AWG); como este é muito grosso e, portanto, de difícil manejo, usam-se em sua substituição dois condutores n.º 8 (AWG) em paralelo.

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{1000}{50}} = 7,5 \sqrt{20} = 33,5; S_g = 1,1 \cdot S_m = \sim 37 \text{ cm}^2$$

Usando-se a lámina n.^o 6, o núcleo central deverá ter as **medidas: 5 cm × 8 cm, de onde resulta:**

$$S_g = 40 \text{ cm}^2; S_m = 36,4 \text{ cm}^2; \text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{36,4} = 1,1$$

$$N_1 = 1,1 \cdot 220 = 242 \text{ esp.}$$

$$N_2 = 1,1 \cdot 24 \cdot 1,1 = 29 \text{ esp.}$$

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 242 \cdot 2,08 + 29 \cdot 16,74 = 503,36 + 485,46 = 988 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{1880}{988} = 1,9. \text{ Execução impossível.}$$

N.B.: Como não convém executar o núcleo em comprimento maior que 8 cm, tenta-se a solução com *lâminas compridas*.

$$S_m = 6,5 \sqrt{\frac{1000}{50}} = 6,5 \sqrt{20} = 29; S_g = 29 \cdot 1,1 = \sim 32 \text{ cm}^2$$

Usa-se *lâmina comprida* n.^o 6 construindo o núcleo com 5 cm de largura e 6,5 cm de comprimento, isto é, 5 × 6,5.

$$S_g = 5 \cdot 6,5 = 32,5 \text{ cm}^2; S_m = \frac{32,5}{1,1} = 29,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{29,5} = 1,35$$

$$N_1 = 1,35 \cdot 220 = 297$$

$$N_2 = 1,35 \cdot 24 \cdot 1,1 = 36$$

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 297 \cdot 2,08 + 36 \cdot 16,74 = 618 + 603 = 1221$$

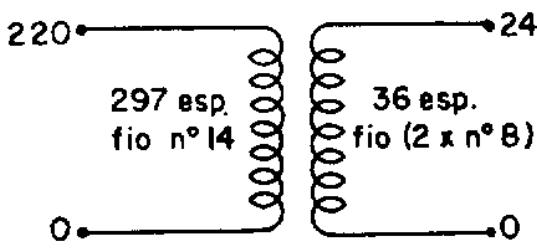


Fig. 77

Da tabela da fig. 65 resulta ser $S_j = 3750 \text{ mm}^2$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{3750}{1221} = 3,07. \text{ Execução possível.}$$

$$P_{te} = 1,580 \cdot 6,5 = 10,250 \text{ kg}$$

$$Im = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 5 + 2 \cdot 6,5 + 0,5 \cdot 5 \cdot 3,14 = 31 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot Im \cdot 9 = \frac{1221}{100} \cdot 31 \cdot 9 = 3,40 \text{ kg}$$

$$W_{eu} = 2,43 \cdot d^2 \dots P_{eu} = 2,43 \cdot 2,5^2 \cdot 3,4 = 52 \text{ watts}$$

$$W_{fe} = 1,15 \cdot 1,72 \cdot 10,25 = 20,3 \text{ watts}$$

$$\text{Perdas totais} = 20,3 + 52 = 72,3 \text{ watts}$$

$$\text{Rendimento } \mu = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1000}{1000 + 72,3} = \frac{1000}{1072,3} = 0,93$$

EXEMPLO N.^o 3

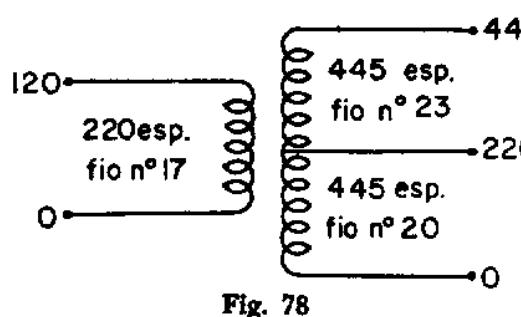
Dados: Transformador monofásico: $f = 60 \text{ Hz}$; $W_2 = 300 \text{ VA}$;
 $V_2 = 220/440 \text{ V}$; $V_1 = 120 \text{ V}$

$$\begin{array}{l|l|l|l} W_2 = 300 & V_2 = \left\{ \begin{array}{l} 220 \\ 440 \end{array} \right. & I_2 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{300}{220} = 1,36 \text{ A} \\ \frac{300}{440} = 0,68 \text{ A} \end{array} \right. & S_2 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,36}{3} = 0,453; \text{ fio n.º 20 (0,518)} \\ \frac{0,68}{3} = 0,23; \text{ fio n.º 23 (0,2552)} \end{array} \right. \\ \hline W_1 = 330 & V_1 = 120 & I_1 = \frac{330}{120} = 2,75 \text{ A} & S_1 = \frac{2,75}{3} = 0,91; \text{ fio n.º 17 (1,04)} \end{array}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{1,25 W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{1,25 \cdot 300}{60}} = 7,5 \sqrt{6,25} = 18,8 \text{ cm}^2$$

$S_g = 18,8 \cdot 1,1 = \sim 21 \text{ cm}^2$. Usa-se lâmina padronizada n.^o 6, executando-se o núcleo com 4 cm de comprimento.

$$S_g = 5 \times 4 = 20 \text{ cm}^2; S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{20}{1,1} = 18,18 \text{ cm}^2$$



$$\text{Esp/volt} = \frac{33,5}{S_m} = \frac{33,5}{18,18} = 1,84$$

$$N_2 = 1,84 \cdot 220 \cdot 1,1 = 445$$

$$N_1 = 1,84 \cdot 120 = 220$$

$$S_{cu} = 220 \cdot 1,04 + 445 \cdot 0,518 + 445 \cdot 0,2552 = 572 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{1880}{572} = 3,3. \text{ O transformador pode ser enrolado.}$$

$$P_{te} = 1,053 \cdot 4 = 4,212 \text{ kg}$$

$$Im = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 5 + 2 \cdot 4 + 0,5 \cdot 5 \cdot 3,14 = \sim 26 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot Im \cdot 9 = \frac{572}{100} \cdot 26 \cdot 9 = 1338 \text{ g} = 1,338 \text{ kg}$$

EXEMPLO N.^o 4

Dados: Transformador monofásico: $f = 50 \text{ Hz}$; $W_2 = 3 \text{ kVA}$;
 $V_2 = 12 \text{ V}$; $V_1 = 220 \text{ V}$

$W_2 = 3000$	$V_2 = 12$	$I_2 = \frac{3000}{12} = 250 \text{ A}$	$S_2 = \frac{250}{2} = 125$; 2 chapas $200 \times 0,3 \text{ mm}$
$W_1 = 3300$	$V_1 = 220$	$I_1 = \frac{3300}{220} = 15 \text{ A}$	$S_1 = \frac{15}{2} = 7,5$; fio n. ^o 8 (8,37)

N.B.: Como a seção do condutor secundário é grande, executa-se com duas chapas de cobre de 200 mm de largura e 0,3 mm de espessura, obtendo-se uma seção.

$$S_2 = 2 \cdot 200 \cdot 0,3 = 120 \text{ mm}^2$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{3000}{50}} = 7,5 \sqrt{60} = 58 \text{ cm}^2$$

$$S_t = 58 \cdot 1,1 = 64 \text{ cm}^2; a = \sqrt{S_t} = \sqrt{64} = 8 \text{ cm}$$

Como não existe lâmina deste tamanho, usa-se ferro não padronizado, executando-se o núcleo quadrado de $8 \times 8 \text{ cm}$.

$$\begin{aligned} S_t &= 8 \cdot 8 = 64 \text{ cm}^2; S_m = \frac{64}{1,1} = \\ &= \frac{40}{40} = \sim 58; \text{ Esp/volt} = \frac{58}{58} = \\ &= 0,69 \end{aligned}$$

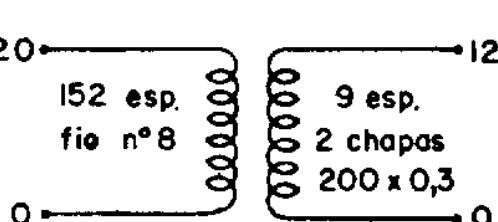


Fig. 79

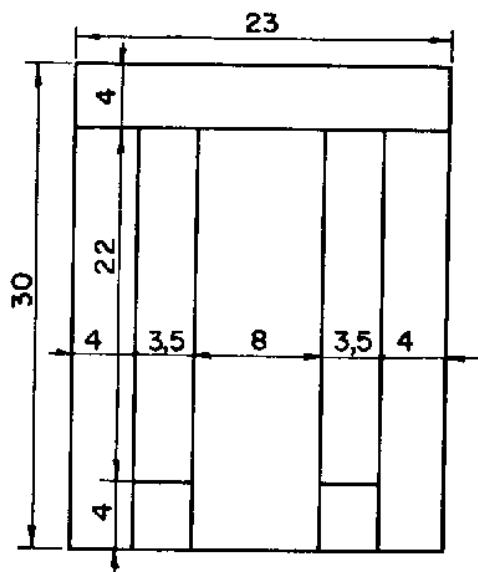


Fig. 80

$$N_1 = 0,69 \cdot 220 = 152 \text{ esp.}$$

$$N_2 = 0,69 \cdot 12 \cdot 1,1 = 9 \text{ esp.}$$

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 152 \cdot 8,37 + 9 \cdot 120 = 1272 + 1080 = 2352 \text{ mm}^2$$

$$S_1 = S_{cu} \cdot 3,3 = 2352 \cdot 3,3 = 7762 \text{ mm}^2$$

Como a chapa de cobre tem 200 mm de largura, executar-se-á a janela com altura de 220 mm, isto é, $H_j = 22 \text{ cm}$. Largura da janela resulta

$$L_j = \frac{S_j}{H_j} = \frac{7762}{220} = \sim 35 \text{ mm} = \sim 3,5 \text{ cm}$$

O aspecto das lâminas do transformador está indicado na fig. 80. A área frontal das chagas é:

$$[30 \cdot 23 - 2 \cdot 22 \cdot 3,5] = 536 \text{ cm}.$$

Considerando-se que dos 8 cm de altura do núcleo uma parte é isolamento entre lâminas, o volume do ferro resulta: $536 \cdot 8 \cdot 0,9 = 3860 \text{ cm}^3$. O peso do núcleo é, portanto, de $3860 \cdot 7,8 = 30108 \text{ g} = \sim 30 \text{ kg}$.

$$lm = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 8 + 2 \cdot 8 + 0,5 \cdot 8 \cdot 3,14 = 44 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot lm \cdot 9 = \frac{2352}{100} \cdot 44 \cdot 9 = 9314 \text{ g} = 9,314 \text{ kg}$$

$$W_{te} = 1,15 \cdot 1,72 \cdot 30 = \sim 60 \text{ watts.}$$

densidade de corrente no primário $d_1 = \frac{I_1}{S_1} = \frac{250}{120} = \sim 2,1 \text{ A/mm}^2$

densidade de corrente no secundário $d_2 = \frac{I_2}{S_2} = \frac{15}{8,37} = \sim 1,8 \text{ A/mm}^2$

$$\text{densidade média de corrente } d = \frac{2,1 + 1,8}{2} = 1,95$$

$$W_{eu} = 2,43 d^2 \cdot P_{eu} = 2,43 \cdot 1,95^2 \cdot 9,314 = 86,2 \text{ watts}$$

$$\text{Perdas totais} = W_t + W_{eu} = 60 + 86,2 = 146,2$$

$$\text{Rendimento do transformador } \mu = \frac{W^2}{W_2 + W} = \frac{300}{3000 + 146,2} = \frac{3000}{3146,2} = 0,95$$

27) CALCULO DAS BOBINAS DE REATÂNCIA

As bobinas de reatância, chamadas também bobinas de choque, têm a finalidade de produzir quedas de tensão.

São constituídas por uma única bobina e calculadas com as mesmas fórmulas dos transformadores, considerando-se, porém, como W_2 a metade do valor da potência nominal da bobina.

Considera-se calibrada a bobina de reatância quando, ao ser atravessada pela corrente nominal, apresenta a impedância desejada. A avaliação da impedância de uma bobina de reatância é feita através da queda de tensão que a mesma produz ao ser atravessada por corrente.

A calibragem da bobina de reatância é feita regulando-se a espessura do entreferro da mesma, por isso a montagem do núcleo de uma bobina de reatância é diferente dos transformadores comuns. Sua montagem é feita com núcleo e âncora separados, conforme fig. 81. A espessura do entreferro corresponde à espessura da cartolina intercalada entre o núcleo e a âncora.

A calibragem da bobina é feita aplicando-se nos bornes da mesma uma diferença de potencial de valor igual ao da queda de tensão que deve produzir, regulando-se o entreferro até que o valor da corrente absorvida seja igual ao nominal.

N.B.: — Aumentando-se o entreferro, diminui a indutância e, por conseguinte, maior será a corrente absorvida e vice-versa.

a) Valores necessários ao projeto

Em geral, para o cálculo de uma bobina de reatância, os valores fornecidos são:

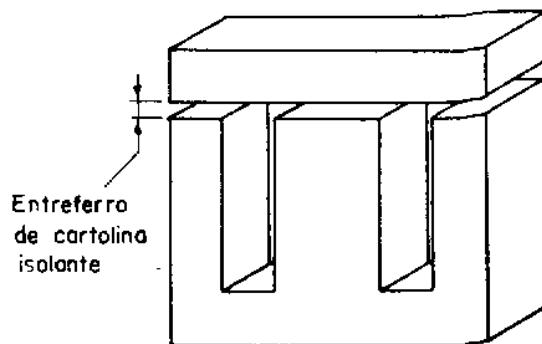


Fig. 81

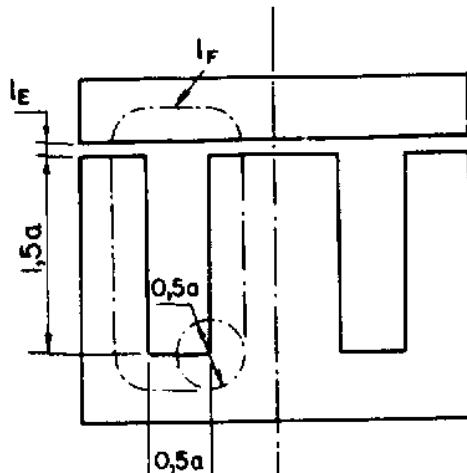


Fig. 82

- Indutância (L) em Henry
- Corrente em ampères ou miliampères (I)
- Freqüência (f)
- A reatância (X) em ohms é obtida por: $X = 2\pi f L$;
- A queda de tensão por: $\Delta V = X I$
- A potência em VA por: $W_a = \Delta V \cdot I$ ou $X I^2$

N.B.: Ao se projetar uma bobina de reatância, despreza-se a resistência elétrica da mesma, pois seu efeito é muito pequeno em relação ao efeito indutivo.

b) Cálculo aproximado do comprimento do entreferro

Uma vez calculadas as espiras (N) da bobina, é possível calcular-se o valor *máximo* da f.m.m. que atua sobre o núcleo da bobina, isto é, $N I_M = N \cdot I \cdot \sqrt{2}$

O comprimento (l_F) do circuito magnético no ferro, conforme fig. 82, é dado por:

$$l_F = 2 \cdot 0,5a + 2 \cdot 1,5a + 0,5a\pi = a + 3a + 0,5a\pi = 5,6a$$

Lembrando-se que a indução máxima deve ser de $B_M = 11\ 300$, procura-se na tabela ou no diagrama o valor das Ampère-espiras máximas por centímetro. Em geral para lâminas de ferro silício, tal valor aproximado é: $A_{eM} = 5,6$.

As Ampère-espiras máximas necessárias à magnetização do núcleo, cujo comprimento em centímetros é (l_F), resultam $A_{eF} = 5,6 \cdot l_F$

Deduzindo-se este valor das Ampère-espiras máximas totais, produzidas pela bobina ($NI_M = NI \sqrt{2}$), obtém-se o valor das Ampère-espiras máximas destinadas ao entreferro.

$$A_{eE} = NI_M - A_{eF}$$

Lembrando-se que cada circuito magnético do núcleo tem dois entreferros e que para o ar $A_{eE} = 0,8 B_M \cdot 2l_E$, o comprimento do entreferro em centímetros, resulta

$$l_E = \frac{A_{eE}}{0,8 B_M \cdot 2}$$

N.B.: Este cálculo fornece uma boa orientação para a fixação aproximada da espessura do entreferro. Seu valor definitivo deverá, porém, ser obtido através da calibragem.

28) EXEMPLOS DE CALCULO DAS BOBINAS DE REATÂNCIA

EXEMPLO N.^o 1

Bobina de reatância: $L = 0,127$ Henry; $f = 50$ Hz; $I = 600$ mA

$$X = 2\pi f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,127 = \sim 40 \text{ ohms}$$

$$\Delta V = X \cdot I = 40 \cdot 0,6 = 24 \text{ volts}$$

$$W_a = \Delta V \cdot I = 24 \cdot 0,6 = 14,4 \text{ VA};$$

$$W_2 = \frac{14,4}{2} = 7,2 \text{ VA}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{7,2}{50}} = 7,5 \sqrt{0,144} = 2,85 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 2,85 = 3,14 \text{ cm}^2$$

Usa-se a lâmina padronizada n.^o 1; seção do núcleo $2 \times 1,5$

$$S_g = 3 \text{ cm}^2; S_m 2,7 \text{ cm}^2$$

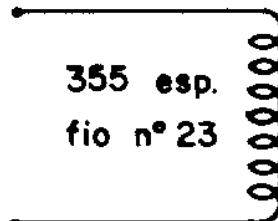
$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{2,7} = 14,8$$

$$\text{Número de espiras} = 14,8 \cdot 24 = 355$$

$$S = \frac{I}{d} = \frac{0,6}{2,5} = 0,24; \text{ usa-se fio n.^o 23 (AWG)}$$

cuja seção é de $0,2552 \text{ mm}^2$

N.B.: — A fim de reduzir a queda ôhmica a valores desprezíveis nas bobinas de reatância, a densidade de corrente é mantida mais baixa que nos transformadores, isto é, emprega-se $d = 2,5 \text{ A/mm}^2$ mesmo para as bobinas pequenas.



Espessura entreferro = 0,13 mm.

Fig. 83

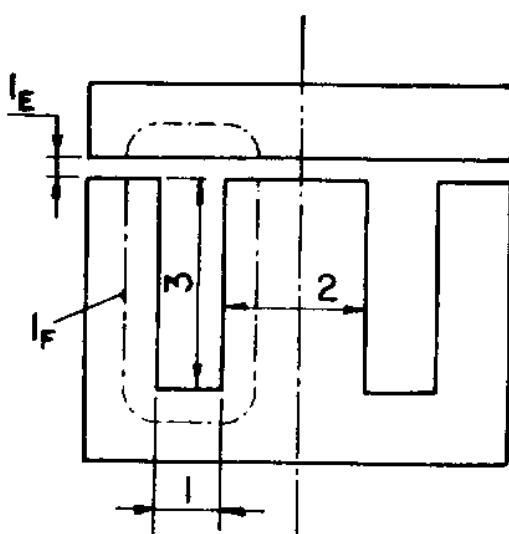


Fig. 84

$$S_{cu} = N \cdot S. = 355 \cdot 0,2552 = \\ = 90,6 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{300}{90,6} = 3,3.$$

Execução possível.

Peso do ferro: $P_{te} = 0,170 \cdot 1,5 = \\ = 0,255 \text{ kg.}$

Comprimento da espira média da bobina: $1m = 2a + 2b + 0,5a\pi = \\ = 4 + 3 + 0,5 \cdot 2 \cdot \pi = 10 \text{ cm}$
aprox.

Peso do cobre:

$$P_{cu} = \frac{100}{S_{cu}} \cdot 1m \cdot 9 = \frac{90,6}{100} \cdot \\ \cdot 9 = 81,54 \text{ g}$$

Cálculo da espessura do entreferro:

$$l_F = 5,6a = 5,6 \cdot 2 = 11,2 \text{ cm}$$

$$NI_M = N I \sqrt{2} = 355 \cdot 0,6 \cdot 1,41 = 300$$

$$\text{A esp. por centímetro } A_{cM} = 5,6$$

$$A_{eF} = 5,6 \cdot l_F = 5,6 \cdot 11,2 = 62,7$$

$$A_{eE} = NI_M - A_{eF} = 300 - 62,7 = 237,3$$

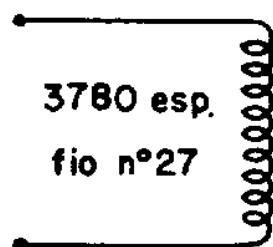
$$l_E = \frac{A_{eE}}{0,8B_M \cdot 2} = \frac{237,3}{0,8 \cdot 11300 \cdot 2} = 0,013 \text{ cm} = 0,13 \text{ mm}$$

EXEMPLO N.^o 2

Bobina de reatância: $L = 17,5 \text{ Henry}; f = 50 \text{ Hz}; I = 250 \text{ mA}$

$$X = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 17,5 = 5495 \text{ ohms}$$

$$\Delta V = X \cdot I = 5495 \cdot 0,25 = 1374 \text{ volts}$$



N.B.: — Esta bobina deverá ter isolamento proporcional à tensão de 1374 volts.

$$W_a = \Delta V \cdot I = 1374 \cdot 0,25 = 344 \text{ VA;}$$

Espes. Entref. = 0,66 mm

$$W_2 = \frac{W_a}{2} = \frac{344}{2} = 172$$

Fig. 85

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{Wa}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{172}{50}} = 7,5 \sqrt{3,44} = 13,9 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 13,9 = 15,29 \text{ cm}^2$$

Usa-se a lâmina n.º 5; seção do núcleo 4×4

$$S_g = 4 \times 4 = 16 \text{ cm}^2; S_m = \frac{16}{1,1} = 14,5 \text{ cm}^2; \text{Esp/volt} = \frac{40}{14,5} = 2,75$$

$$\text{Número de espiras} = 2,75 \cdot 1374 = \sim 3780$$

$$S = \frac{0,25}{2,5} = 0,1 \text{ mm}^2; \text{usa-se fio n.º 27 (AWG) cuja seção é } 0,1 \text{ mm}^2$$

$$S_{cu} = N \cdot S = 3780 \cdot 0,1 = 378 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{1200}{378} = 3,17. \text{ Execução possível.}$$

$$\text{Peso do ferro: } 0,674 \cdot 4 = 2,7 \text{ kg}$$

Comprimento da espira média da bobina

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 8 + 8 + 6,3 = 22,3 \text{ cm}$$

$$\text{Peso do cobre: } \frac{S_{cu}}{100} \cdot l_m \cdot 9 = \frac{378}{100} \cdot 22,3 \cdot 9 = 760 \text{ g}$$

Cálculo da espessura do entreferro:

$$l_F = 5,6a = 5,6 \cdot 4 = 22,4 \text{ cm}$$

$$NI_M = NI \cdot \sqrt{2} = 3780 \cdot 0,25 \cdot 1,41 = 1330$$

$$A/\text{espiras por centímetro} = A_{ec} = 5,6$$

$$A_{eF} = 5,6 \cdot l_F = 5,6 \cdot 22,3 = 125$$

$$A_{eE} = NI_M - A_{eF} = 1330 - 125 = \sim 1205$$

$$l_E = \frac{A_{eE}}{0,8 B_M \cdot 2} = \frac{1205}{0,8 \cdot 11300 \cdot 2} = 0,066 \text{ cm} = 0,66 \text{ mm.}$$

EXEMPLO N.º 3

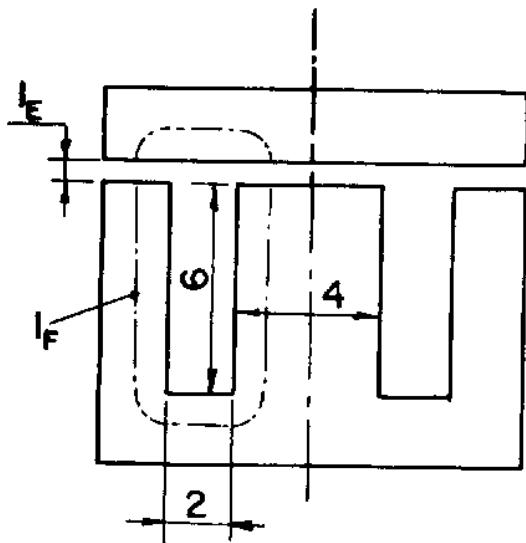


Fig. 86

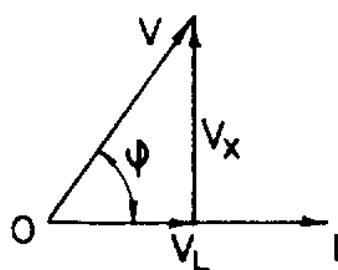
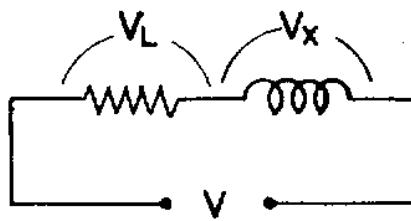
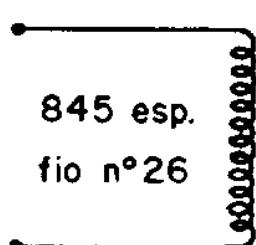


Fig. 87



Espes. Entref. = 0,22 mm

Fig. 88

Cálculo da bobina de reatância (Reator) para uma lâmina fluorescente de 20 watts; 110 volts; $I = 0,4 \text{ A}$.

É sabido que a tensão de funcionamento da lâmpada fluorescente de 20 watts é de 55 volts, tensão esta em fase com a corrente, conforme fig. 87.

A queda de tensão V_x provocada pelo reator está defasada de aproximadamente 90° em adiantamento sobre a corrente. Considerando o triângulo das tensões, a queda V_x é obtida pela seguinte expressão:

$$V_x = \sqrt{V^2 - V_L^2} \text{ de onde}$$

$$V_x = \sqrt{110^2 - 55^2} = 95 \text{ volts}$$

Esta queda de tensão deverá ser provocada pela corrente absorvida pela lâmpada, isto é, 0,4 A.

$$W_a = 95 \cdot 0,4 = 38 \cdot \text{VA}; W_2 = 19$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{19}{50}} =$$

$$7,5 \cdot 0,62 = 4,65; S_e = 1,1 \cdot 4,65 = 5,1$$

Usa-se lâmina padronizada n.º 1; seção do núcleo $2 \times 2,5$

$$S_g = 2 \times 2,5 = 5 \text{ cm}^2; S_m = \frac{5}{1,1} =$$

$$= 4,5 \text{ cm}^2; \text{ Esp/volt} = \frac{40}{4,5} = 8,9$$

Número de espiras = $8,9 \cdot 95 = 845$

$$S = \frac{0,4}{3} = 0,13 \text{ mm}^2; \text{ usa-se fio}$$

n.º 26 (AWG) cuja seção é $0,1256 \text{ mm}^2$.

$$S_{eu} = N \cdot S = 845 \cdot 0,1256 = \\ = 106 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{300}{106} = \sim 3$$

Execução possível.

Peso do ferro: $P_{fe} = 0,170 \cdot 2,5 = 0,420 \text{ kg.}$

$$lm = 2a + 2b + 0,5a\pi = 4 + 5 + 3,14 = 12,14 \text{ cm.}$$

Peso do cobre:

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot lm \cdot 9 = \frac{106}{100} \cdot 12,14 \cdot 9 = 116 \text{ g}$$

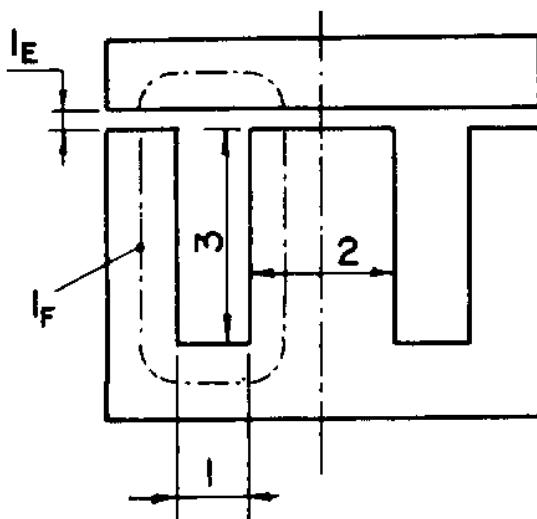


Fig. 89

Cálculo da espessura do entreferro:

$$l_F = 5,6a = 5,6 \cdot 2 = 11,2 \text{ cm}$$

$$NI_M = N \cdot I \cdot \sqrt{2} = 845 \cdot 0,4 \cdot 1,41 = 475$$

$$\text{A esp. por centímetro: } A_{ec} = 5,6$$

$$A_{ef} = A_{ec} \cdot l_F = 5,6 \cdot 11,2 = 62,7$$

$$A_{ce} = NI_M - A_{ef} = 475 - 62,7 = 412,3$$

$$l_E = \frac{A_{ef}}{0,8 \cdot B_M \cdot 2} = \frac{412,3}{0,8 \cdot 11300 \cdot 2} = 0,022 \text{ cm} = 0,22 \text{ mm}$$

29) CALCULO DOS TRANSFORMADORES DE ACOPLAMENTO

Os transformadores de acoplamento são os que conectam dois estágios de impedância diferente, do mesmo aparelho (rádio, televisão, etc.). Assim, por exemplo, para conectar um alto-falante (baixa impedância) ao circuito de alimentação (alta impedância) é preciso um transformador de acoplamento, chamado, neste caso, de transformador de saída.

Os transformadores de acoplamento, em geral, trabalham como transformadores de corrente, sendo que cada um dos circuitos deve apresentar a impedância desejada quando atravessado pela corrente nominal.

Nestas condições, os transformadores de acoplamento podem ser considerados como duas bobinas de reatância, com impedância diferente, ligadas magneticamente, apresentando efeitos de mútua indução.

O núcleo destes transformadores deve ser montado conforme a fig. 90, isto é, com a mesma disposição do núcleo da bobina de reatância, devendo a espessura do entreferro ser calibrada ou calculada com o processo descrito pelas bobinas de reatância.

Os transformadores de acoplamento que trabalham com audiofrequência, isto é, com a freqüência do som e da voz, estão sujeitos a freqüências variáveis entre 30 e 800 ciclos por segundo. Ao se calcular um destes transformadores é preciso fixar a freqüência a ser usada no cálculo. Se a freqüência for baixa, o transformador resulta volumoso, de boa qualidade mas de preço elevado. Se, pelo contrário, a freqüência escolhida for alta, o transformador resulta de custo reduzido mas de qualidade inferior, isto é, apresenta distorções indesejáveis na corrente, as quais alteram a qualidade do som ou da voz a ser reproduzida.

A fim de se ter uma idéia da freqüência a ser escolhida, para efeito de cálculo dos transformadores de acoplamento, observam-se os valores indicados a seguir.

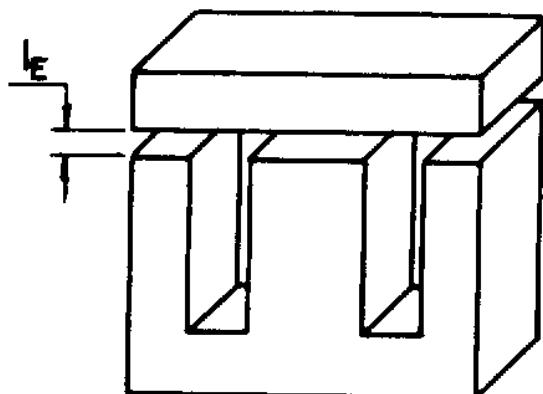


Fig. 90

$f = 150$ Hz, para transformadores econômicos de qualidade inferior

$f = 70$ Hz, para transformadores comuns de rádio

$f = 40$ Hz, para transformadores de rádios e vitrolas de boa qualidade

$f = 30$ Hz, para transformadores de aparelhos de alta fidelidade.

a) Valores necessários ao projeto

Em geral, para o cálculo de um transformador de acoplamento, os valores fornecidos são:

Potência nominal W em VA

Impedância primária Z_1 em ohms

Impedância secundária Z_2 em ohms

Corrente primária ou secundária I_1 ou I_2 em Ampères.

O cálculo da corrente primária e secundária, em relação à potência nominal W e o valor da impedância do respectivo enrolamento, é feito baseando-se na fórmula:

$$W = V \cdot I = Z \cdot I^2$$

Assim sendo:

$$I_1 = \sqrt{\frac{W}{Z_1}} \text{ e } I_2 = \sqrt{\frac{W}{Z_2}}$$

As tensões existentes nos bornes dos circuitos primário e secundário são obtidas por:

$$V_1 = Z_1 I_1 \text{ e } V_2 = Z_2 I_2$$

Uma vez calculados I_1 ; I_2 ; V_1 e V_2 , o projeto do transformador é feito com as fórmulas usuais, sem porém se acrescentarem espiras no secundário, conforme se faz para os transformadores comuns, a fim de compensar as quedas de tensão.

b) *Cálculo aproximado do comprimento do entreferro*

O cálculo do comprimento do entreferro é feito pelo processo já indicado para as bobinas de reatância, tomando-se para isso os valores de qualquer dos circuitos do transformador.

30) EXEMPLOS DE CÁLCULO DOS TRANSFORMADORES DE ACOPLAMENTO

EXEMPLO N.^o 1

Transformador de saída para vitrola de boa qualidade com as seguintes características:

$$Z_1 = 7000 \text{ ohms; } Z_2 = 5 \text{ ohms; } I_1 = 40 \text{ mA}$$

Em vista da finalidade do transformador, escolhe-se como valor da freqüência $f = 50$ Hz.

$$W_1 = Z_1 I_1^2 = 7000 \cdot 0,04^2 = 11,2 \text{ VA; } V_1 = Z_1 I_1 = 7000 \cdot 0,04 = 280 \text{ volts}$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{W}{Z_2}} = \sqrt{\frac{11,2}{5}} = 1,5 \text{ Amp.; } V_2 = Z_2 I_2 = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ volts}$$

Organizando-se os cálculos como para os transformadores comuns, obtém-se:

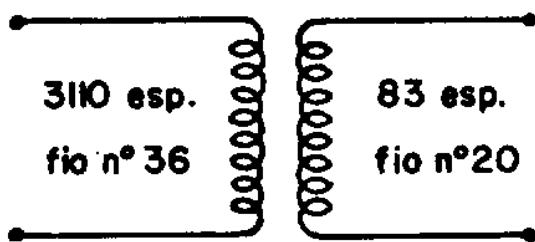
$$W_1 = 11,2; V_1 = 280; I_1 = 0,04; S_1 = \frac{0,04}{3} = 0,0133; \text{ fio n.^o 36 (0,0132)}$$

$$W_2 = 11,2; V_2 = 7,5; I_2 = 1,5; S_2 = \frac{1,5}{3} = 0,5; \text{ fio n.^o 20 (0,518)}$$

$$S_r = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{11,2}{50}} = 7,5 \cdot 0,48 = 3,6 \text{ cm}^2; S_g = 3,6 \cdot 1,1 = 3,96 \text{ cm}^2$$

Usa-se lâmina padronizada n.º 1; seção do núcleo 2×2 ;

$$S_g = 2 \times 2 = 4 \text{ cm}^2; S_m = \frac{4}{1,1} = 3,6 \text{ cm}^2; \text{Esp/volt} = \frac{40}{3,6} = 11,11$$



Espessura Entreferro = 0,06 mm

Fig. 91

$$\begin{aligned} N_1 &= 11,11 \cdot V_1 = 11,11 \cdot 280 = \\ &= 3110 \text{ esp.} \\ N_2 &= 11,11 \cdot V_2 = 11,11 \cdot 7,5 = \\ &= 83 \text{ esp.} \\ S_{eu} &= N_1 \cdot S_1 + N_2 \cdot S_2 = \\ &= 3110 \cdot 0,0132 + 83 \cdot 0,518 = \\ &= 41 + 43 = 84 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{S_j}{S_{eu}} = \frac{300}{84} = 3,57.$$

Execução possivel.

Peso do ferro = $0,170 \times 2 = 0,34 \text{ kg}$

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 4 + 4 + 3,14 = 11,14 \text{ cm}$$

$$\text{Peso do cobre} = \frac{S_{eu}}{100} \cdot l_m \cdot 9 = \frac{84}{100} \cdot 11,14 \cdot 9 = 84 \text{ g}$$

Cálculo da espessura do entreferro

$$l_F = 5,6a = 5,6 \cdot 2 = 11,2 \text{ cm}$$

$$NI_M = N_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} = 3110 \cdot 0,04 \cdot 1,41 = 175,4$$

$$A_{eF} = 5,6$$

$$A_{eF} = 5,6 \cdot l_F = 5,6 \cdot 11,2 = 62,7$$

$$A_{eE} = NI_M - A_{eF} = 175,4 - 62,7 = 112,7$$

$$l_E = \frac{A_{eE}}{0,8 \cdot B_M \cdot 2} = \frac{112,7}{0,8 \cdot 11300 \cdot 2} = 0,006 \text{ cm} = 0,06 \text{ mm}$$

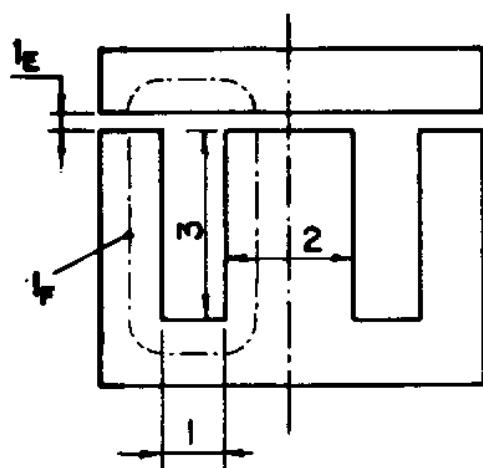


Fig. 92

EXEMPLO N.^o 2

A fim de mostrar como influí a escolha da freqüência no projeto de um transformador de acoplamento, recalcula-se o transformador do exemplo n.^o 1 para a freqüência de $f = 150 \text{ Hz}$.

$W_1 = 11,2; V_1 = 280; I_1 = 0,04; S_1 = 0,0133$, usa-se fio n.^o 36 ($S = 0,0132$)

$W_2 = 11,2; V_2 = 7,5; I_2 = 1,5; S_2 = 0,5$, usa-se fio n.^o 20 ($S = 0,518$)

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{11,2}{150}} = 7,5 \sqrt{0,075} = 7,5 \cdot 0,27 = 2,025 \text{ cm}^2$$

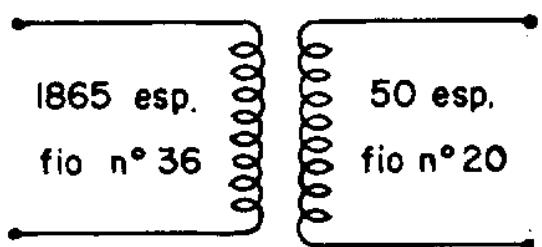
$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 2,025 = 2,22 \text{ cm}^2$$

Usa-se lâmina padronizada n.^o 0; seção do núcleo $1,5 \times 1,5$

$$S_g = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25 \text{ cm}^2;$$

$$S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{2,25}{1,1} = 2 \text{ cm}^2$$

$$\begin{array}{c} 50 \\ 40 \cdot \hline \\ 150 \end{array} \quad \frac{13,33}{2} \quad \text{Esp/volt} = \frac{13,33}{2} = 6,66$$



Espessura Entreferro = 0,03 mm

Fig. 93

$$N_1 = 6,66 \cdot 280 = 1865 \text{ espiras}$$

$$N_2 = 6,66 \cdot 7,5 = 50 \text{ espiras}$$

$$S_{eu} = N_1 \cdot S_1 + N_2 S_2 = 1865 \cdot 0,0132 + 50 \cdot 0,518 = 24,6 + 25,9 = 50,5 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{eu}} = \frac{168}{50,5} = 3,33. \text{ Execução possível.}$$

Peso do ferro: $0,095 \cdot 1,5 = 0,142 \text{ kg}$

$$lm = 2a + 2b + 0,5a\pi = 3 + 3 + 2,4 = 8,4 \text{ cm}$$

$$P_{eu} = \frac{S_{eu}}{100} \cdot lm \cdot 9 = \frac{50,5}{100} \cdot 8,4 \cdot 9 = 38 \text{ g}$$

N.B.: — O peso do cobre e do ferro deste transformador é consideravelmente menor que o do caso precedente.

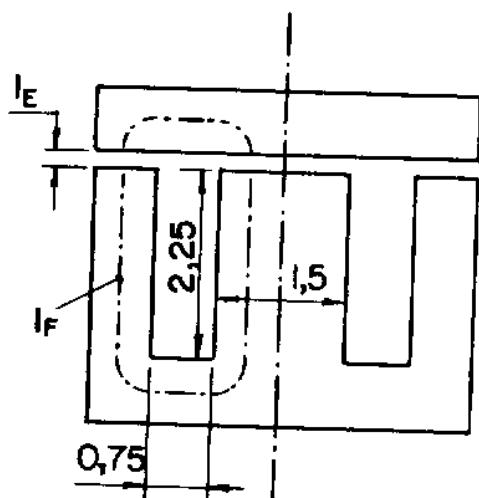


Fig. 94

Cálculo da espessura do entreferro

$$l_F = 5,6a = 5,6 \cdot 1,5 = 8,4 \text{ cm.}$$

$$NI_M = N_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} = 1865 \cdot 0,04 \cdot 1,41 = 105$$

$$A_{ec} = 5,6$$

$$A_{eF} = A_{ec} \cdot l_F = 5,6 \cdot 8,4 = 47.$$

$$A_{eE} = NI_M - A_{eF} = 105 - 47 = 58$$

$$l_E = \frac{A_{eE}}{0,8 \cdot B_M \cdot 2} = \frac{58}{0,8 \cdot 11300 \cdot 2} = \\ = 0,003 \text{ cm} = 0,03 \text{ mm}$$

CAPÍTULO III

31) TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM REGIME DESEQUILIBRADO — APLICAÇÕES CARACTERÍSTICAS DOS DIFERENTES AGRUPAMENTOS

Os transformadores trifásicos são constituídos pelo agrupamento de três transformadores monofásicos sobre o mesmo núcleo de três colunas, conforme fig. 95.

Enquanto a carga secundária for equilibrada e simétrica, o funcionamento do transformador trifásico pode ser estudado, observando-se uma só fase, qualquer que seja o esquema das conexões das fases primárias e secundárias.

Esta simplificação de estudo não é mais possível quando o transformador trifásico deve alimentar uma carga fortemente desequilibrada. Neste último caso o funcionamento do transformador dependerá do tipo de agrupamento das fases primárias e secundárias. Serão examinados a seguir, os vários tipos de agrupamentos.

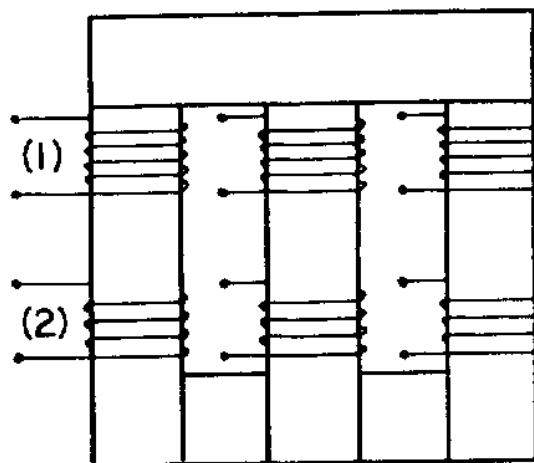


Fig. 95

a) Agrupamento estrela-estrela com ou sem fio neutro

Considere-se o esquema indicado na fig. 96 (a), no qual está ligada uma carga monofásica entre uma fase e o neutro.

A corrente I_2 fornecida pela fase secundária com carga provoca a absorção de uma corrente I_1 na correspondente fase primária.

Se o circuito primário possui também o fio neutro, a corrente I_1 volta através deste, sem interessar as outras duas fases.

Neste caso o funcionamento do transformador mantém-se regular, pois além da queda de tensão na fase afetada nenhum outro fenômeno perturbador se verifica. As f.e.m. das três fases secundárias continuam ainda iguais e simétricas.

Se o circuito primário não possui fio neutro, a corrente I_1 deve necessariamente fazer seu retorno através das outras duas fases primárias. As correntes que atravessam estas duas fases, não sendo equilibradas por nenhuma corrente secundária, agem como correntes magnetizantes nas respectivas colunas.

Em consequência destas correntes magnetizantes, produz-se um forte desequilíbrio nos fluxos das três colunas e por conseguinte resultam desequilibradas também as f.e.m. primárias e secundárias. Uma das f.e.m. secundárias diminui consideravelmente, enquanto as outras duas aumentam, conforme o diagrama da fig. 96 (b).

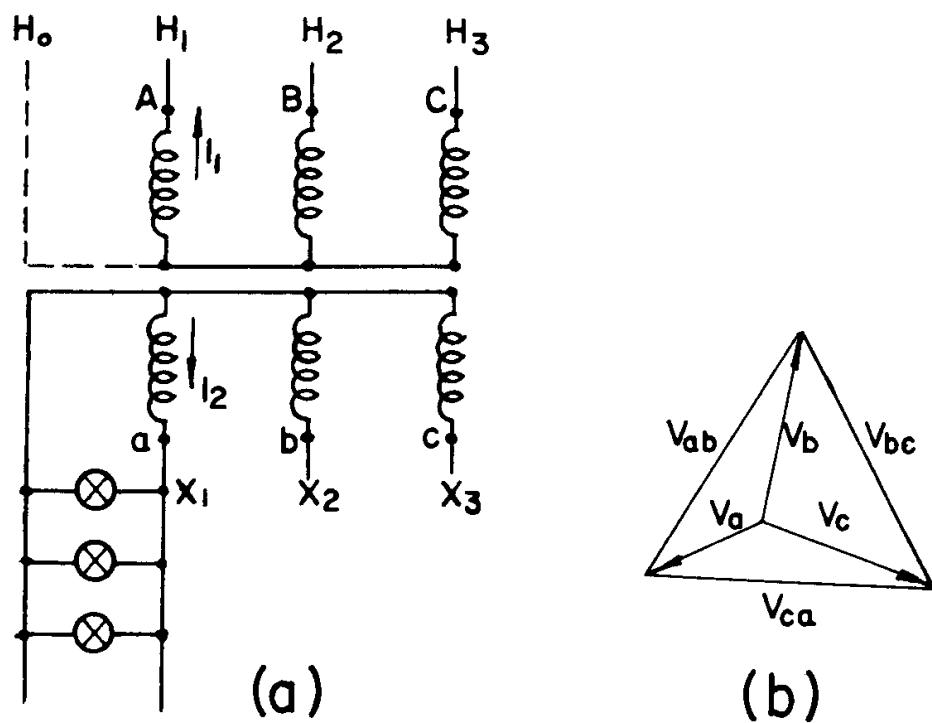


Fig. 96

O diagrama vetorial da fig. 96 (b) mostra também que o desequilíbrio interessa unicamente as tensões de fase, enquanto as tensões concatenadas continuam iguais e simétricas, como o são também as correspondentes tensões primárias.

Pelo exposto conclui-se que o agrupamento estrela-estrela não é conveniente para cargas secundárias desequilibradas com fio neutro, a não ser quando providas de fio neutro também as fases primárias.

O sistema de ligação estrela-estrela é empregado exclusivamente em sistemas de três fios com cargas praticamente equilibradas.

O agrupamento das fases em estrela apresenta a vantagem de necessitar de reduzido isolamento das bobinas com as colunas, pois tal isolamento é proporcional à tensão de fase que é $\sqrt{3}$ vezes menor que a tensão concatenada.

Por esta razão o agrupamento estrela-estrela é empregado nos transformadores de alta tensão.

b) Agrupamento triângulo-estrela com ou sem fio neutro

Observando-se o esquema da fig. 97, vê-se que a conexão triângulo-estrela presta-se otimamente para suportar uma carga monofásica. A

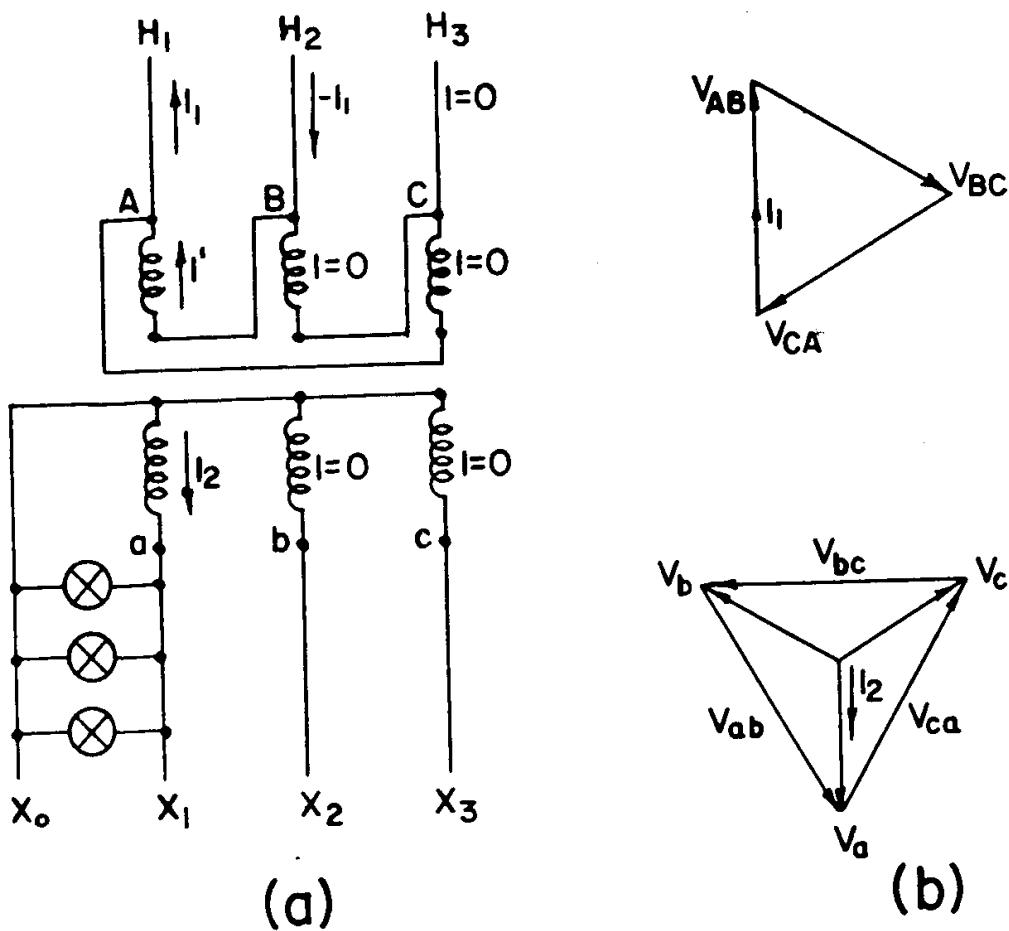


Fig. 97

carga monofásica em questão é alimentada por uma fase secundária e o neutro, e não altera as tensões das demais fases.

A corrente secundária I_2 provoca a absorção da corrente primária I_1 , a qual circula através dos fios H_1 e H_2 sem interessar as outras duas fases primárias.

O diagrama vetorial das tensões e correntes primárias e secundárias adquire a forma indicada na fig. 97 (b).

Cada coluna do transformador funciona como um transformador monofásico independente. Este tipo de conexão é portanto o indicado para transformadores redutores que alimentam redes de distribuição de baixa tensão com quatro fios.

A ligação triângulo-estrela sem fio neutro encontra amplo emprego nos transformadores elevadores das usinas geradoras. Nestes, a ligação em estrela dos enrolamentos de alta tensão resulta mais conveniente por necessitar menor isolamento.

A conexão em triângulo das fases primárias permite a circulação livre da terceira harmônica das correntes magnetizantes, assegurando assim a forma senoidal dos fluxos e das tensões.

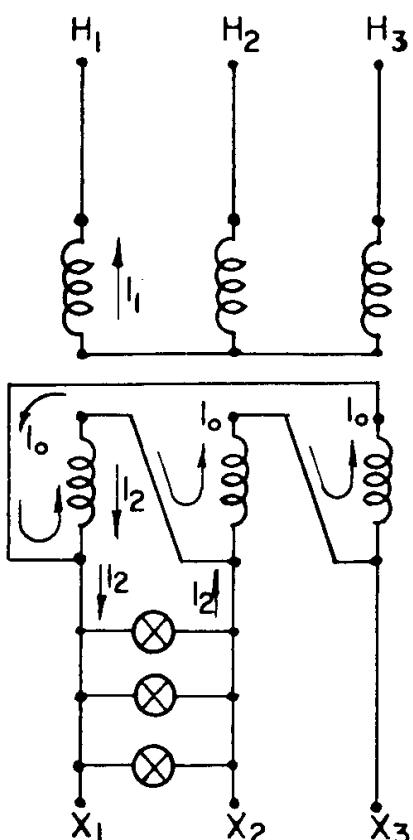


Fig. 98

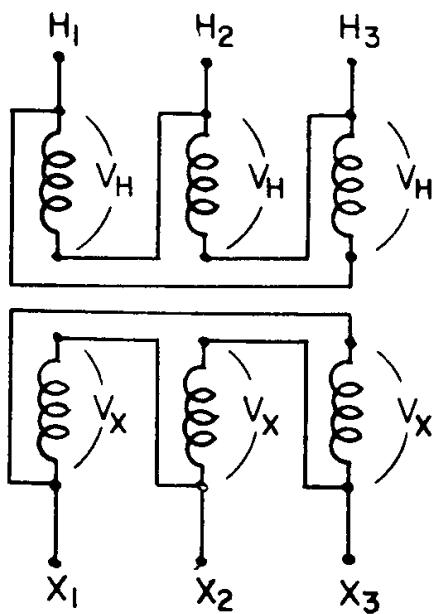


Fig. 99

c) *Agrupamento estrela-triângulo*

Quando as fases secundárias do transformador estão ligadas em triângulo, as respectivas tensões são obrigadas a admitir resultante igual a zero, isto é, os vetores representativos devem formar um triângulo fechado.

Cada desequilíbrio que tende a produzir-se entre estas tensões é compensado por uma corrente I_o que circula nas três fases.

Aplicando-se uma carga monofásica, conforme fig. 98, as tensões secundárias continuam iguais e simétricas. A corrente de circulação interna I_o produz no triângulo secundário elevadas perdas ôhmicas e dispersões magnéticas.

d) *Agrupamento triângulo-triângulo*

Neste tipo de agrupamento as tensões primárias de linha resultam diretamente aplicadas às fases primárias do transformador, transformando-se nas correspondentes tensões secundárias de linha.

Assim sendo, resulta que excluindo as pequenas dissimetrias devidas às diferentes quedas de tensão, as tensões secundárias podem ser consideradas iguais e simétricas, qualquer que seja o desequilíbrio da carga.

O agrupamento triângulo-triângulo é considerado ótimo para alimentar cargas fortemente desequilibradas.

Este tipo de agrupamento tem a notável característica de manter inalteradas as três tensões secundárias, também quando se interrompe ou se elimina um lado do triângulo, conforme fig. 100 (a).

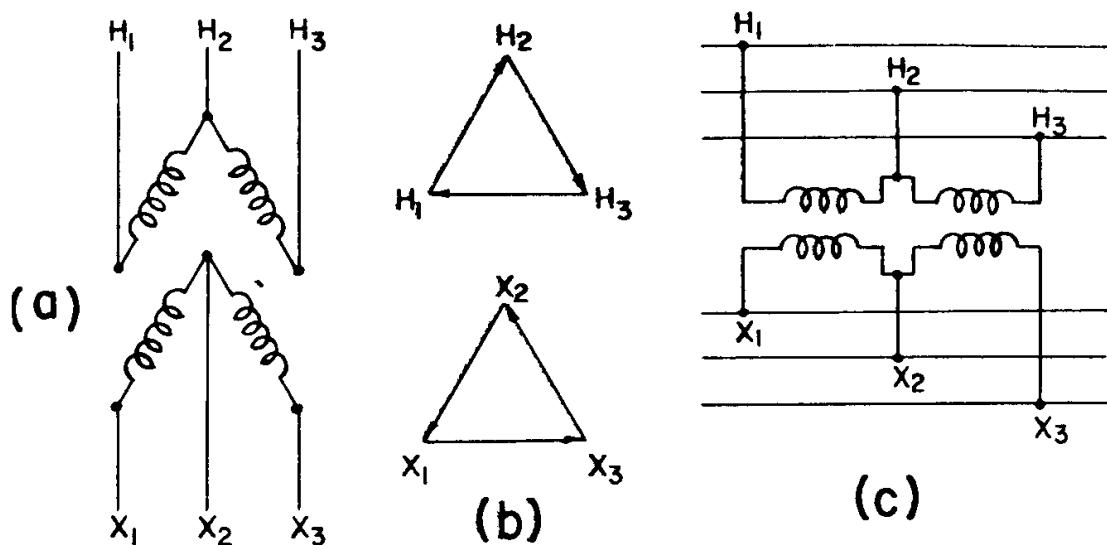


Fig. 100

Realiza-se assim um transformador com triângulo aberto ou em "V", o que se verifica através do diagrama vetorial da fig. 100 (b). A tensão secundária X_1X_3 é idêntica à que existia no funcionamento com o triângulo fechado. Esta propriedade é particularmente interessante quando são empregados transformadores monofásicos, pois oferece a possibilidade de realizar a transformação trifásica somente com dois transformadores monofásicos ligados conforme fig. 100 (c). A potência que pode ser transformada com este sistema é 58 % da relativa ao triângulo completo.

e) Agrupamento estrela-ziguezague

O agrupamento estrela-ziguezague corresponde ao esquema da fig. 101. Cada fase secundária compõe-se de duas metades, dispostas sobre duas diferentes colunas, agrupadas em série, entre si, em sentido contrário uma com respeito à outra.

Este agrupamento tem como consequência a eliminação da terceira harmônica da tensão secundária estrelada. Ligando-se, em série, duas bobinas de fases diferentes, uma em sentido contrário da outra as terceiras harmônicas das tensões nas referidas bobinas se anulam reciprocamente.

A subdivisão de cada fase secundária sobre duas colunas tem também a finalidade de compensar os desequilíbrios das tensões devidos à dissimetria da carga nas três fases.

Este tipo de agrupamento pode ser empregado, vantajosamente, em substituição ao triângulo-estrela, na alimentação de redes de baixa tensão com quatro fios.

Na fig. 101 (b) está indicado o diagrama vetorial da transformação. A tensão de fase primária H_1 determinará nas duas meias fases secun-

dárias, enroladas na mesma coluna, as tensões v_1 e v_1' . Estas duas tensões secundárias são iguais e em fase entre si, mas opostas a H_1 .

Analogamente, à tensão H_2 correspondem as duas tensões transformadas v_2 e v_2' , e por fim à tensão primária H_3 as duas tensões v_3 e v_3' .

Em vista dos agrupamentos feitos entre as bobinas secundárias, as tensões de fase secundária atuam entre o centro X_0 e os bornes $x_1; x_2; x_3$. A tensão entre x_0 e X_2 , representa a diferença vetorial entre a tensão v_1 (meia bobina da primeira coluna) e a tensão v_2' (meia bobina da segunda coluna), estando as duas bobinas agrupadas em série, uma em sentido contrário da outra.

Verifica-se então: $\bar{V}_{x_2} = \bar{v}_1 - \bar{v}_2'$
analogamente:

$$\bar{V}_{x_3} = \bar{v}_2 - \bar{v}'_3 \text{ e } \bar{V}_{x_1} = \bar{v}_3 \bar{v}'_1 - \bar{v}_2'$$

As três tensões de fase secundárias resultam compostas conforme indica o diagrama da fig. 101 (c).

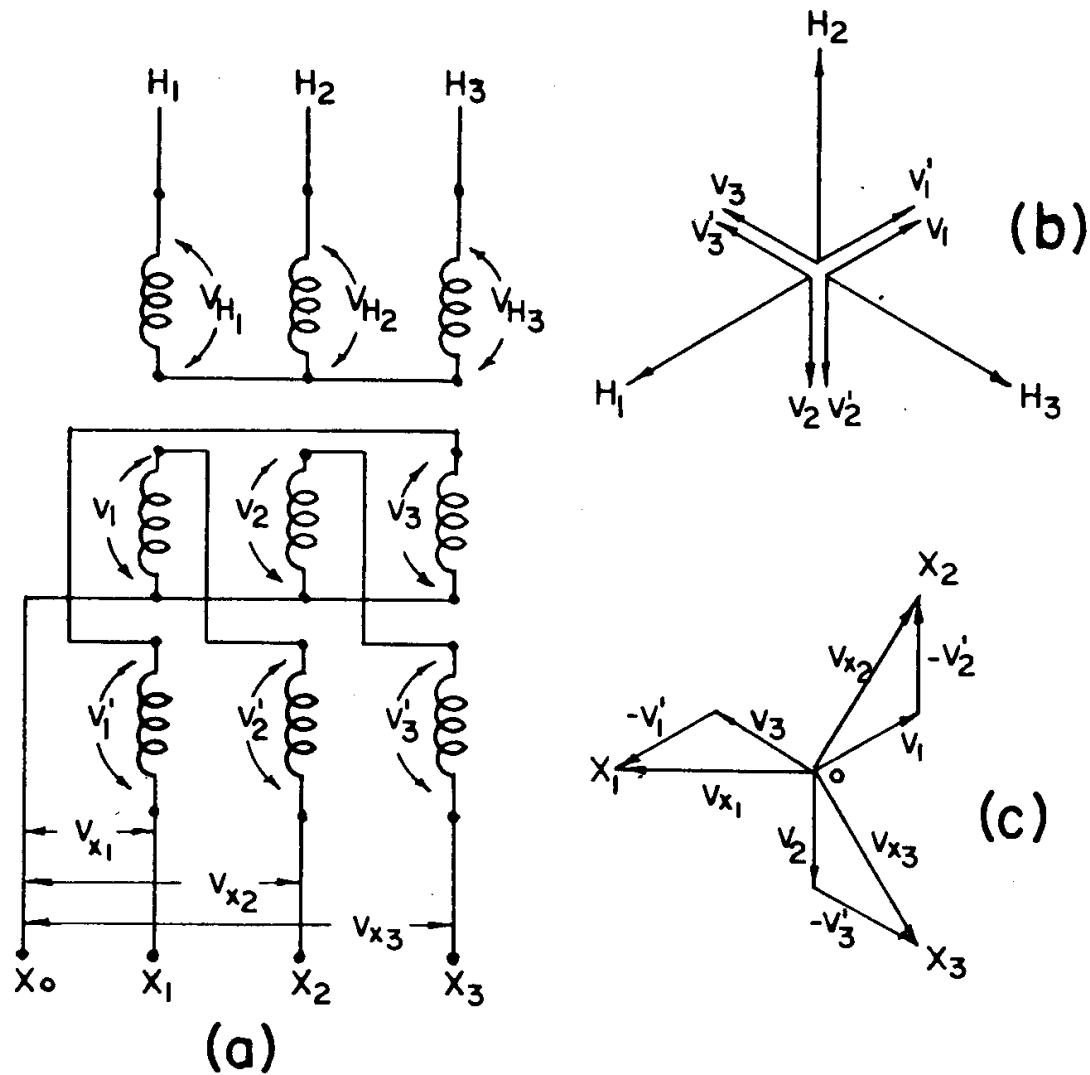


Fig. 101

Indicando com N_1 o número de espiras de cada fase primária e com N_2 o número de espiras de cada fase secundária, obtém-se:

$$v_1 = v_1' = \frac{N_2/2}{N_1} V_H = \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} V_H$$

Do diagrama da fig. 101 (c) resulta que a tensão de fase secundária v_x é fornecida em valor pela expressão:

$$v_x = \sqrt{3} v_1$$

resulta então

$$V_x = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_2}{N_1} V_H = 0,865 \frac{N_2}{N_1} V_H$$

Usando-se o mesmo número de espiras, o agrupamento ziguezague fornece uma tensão secundária igual a 86,5% da tensão que se obteria com o agrupamento normal em estrela.

Inversamente, para se obter a mesma tensão secundária com o agrupamento ziguezague, precisa-se aumentar o número das espiras secundárias da quantidade correspondente à relação:

$$\frac{1}{\frac{2}{\sqrt{3}}} = \frac{1}{0,865} = 1,156$$

ou seja de 15,6%.

Para aplicações especiais o maior custo do agrupamento ziguezague é compensado pela vantagem da eliminação da terceira harmônica das tensões secundárias e de ter-se um transformador capaz de suportar cargas desequilibradas.

32) CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO DOS TRANSFORMADORES DE PEQUENA POTÊNCIA, TRIFÁSICOS, COM REFRIGERAÇÃO NATURAL

Conforme foi visto anteriormente, o transformador trifásico é constituído por três transformadores monofásicos idênticos que constituem as fases. O cálculo do transformador trifásico se reduz, então, ao cálculo de um dos transformadores monofásicos que o compõem.

A potência aparente deste transformador monofásico é $1/3$ da potência aparente total do transformador trifásico, isto é:

$$W_t = \frac{W_{tot}}{3}$$

Para o cálculo do número das espiras e da seção dos condutores é preciso que seja observada a tensão das fases primárias e secundárias, como também o sistema de ligação das mesmas.

Convém lembrar que para ligações em triângulo

$$V_t = V$$

e para ligações em estrela

$$V_t = \frac{V}{\sqrt{3}}$$

Conhecidas a potência e as tensões primária e secundária de cada transformador monofásico, o cálculo se processa com as fórmulas já conhecidas.

Como para os transformadores trifásicos não existem lâminas padronizadas, as mesmas devem ser calculadas, o que é feito após a determinação de seção do cobre:

$$S_{eu} = N_1 S_1 + N_2 S_2$$

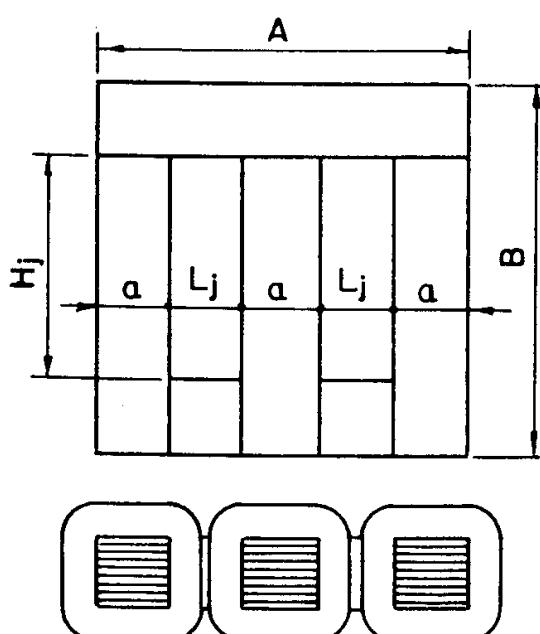


Fig. 102

Em cada janela devem ficar as bobinas de dois transformadores monofásicos adjacentes, conforme fig. 102, por isso a seção total do cobre existente numa janela é $2 S_{eu}$.

Para se ter certeza de que as duas bobinas podem ficar suficientemente distanciadas e isoladas, fixa-se como área da janela o valor

$$S_j = 2 S_{eu} \cdot 3,5$$

Fixando-se a largura da janela L_j aproximadamente igual ao valor de a , calcula-se a altura da janela com a relação

$$H_j = \frac{S_j}{L_j}$$

Para o cálculo do peso do ferro é preciso avaliar a superfície frontal do núcleo em centímetros quadrados, que é dada por

$$A_{\text{front}} = A \cdot B - 2 \cdot L_j \cdot H_j$$

O volume de núcleo é dado por $(A \cdot B - 2L_j \cdot H_j) \cdot b \cdot 0,9$ e por fim o peso em quilos do núcleo é dado por

$$P_{\text{fe}} = \frac{(A \cdot B - 2L_j \cdot H_j) \cdot b \cdot 0,9 \cdot 7,8}{1000}$$

Para a avaliação do peso do cobre é preciso calcular o comprimento da espira média da bobina, que é dado por:

$l_m = 2a + 2b + 0,5L_j \cdot \pi$; no caso de ser $L_j = a$, a fórmula para o cálculo da espira média é idêntica à do transformador monofásico, isto é: $l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi$.

O peso do cobre de uma bobina, em gramas, é calculado pela conhecida fórmula

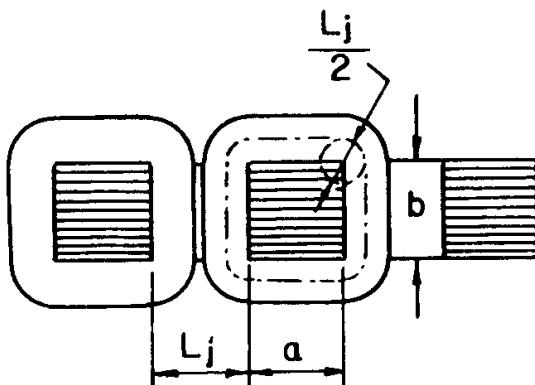


Fig. 103

$$P_{\text{cu}} = \frac{S_{\text{cu}}}{100} \cdot l_m \cdot 9$$

Como o transformador tem três bobinas, o peso total do cobre, em gramas, é dado por:

$$P_{\text{cu}} = \frac{S_{\text{cu}}}{100} \cdot l_m \cdot 9 \cdot 3 = 0,27 S_{\text{cu}} l_m$$

As perdas no ferro são fornecidas por:

$$W_{\text{fe}} = \omega_{\text{fe}} \cdot P_{\text{fe}}$$

onde ω_{fe} é fornecido pelas tabelas das figs. 21 e 24.

As perdas no cobre são fornecidas aproximadamente pela relação:

$$W_{\text{cu}} = 3 \cdot 2,43 \cdot d^2 \cdot P_{\text{cu}}$$

onde d corresponde à densidade de corrente em ampères por milímetro quadrado e P_{cu} é o peso do cobre em quilos.

O rendimento do transformador é dado por:

$$\mu = \frac{W_{\text{forn.}}}{W_{\text{forn.}} + W_{\text{te}} + W_{\text{cu}}}$$

33) EXEMPLOS DE CÁLCULO DOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM REFRIGERAÇÃO NATURAL

EXEMPLO N.º 1

Transformador trifásico: $f = 50 \text{ Hz}$; $P_{a2} = 2 \text{kVA}$; $V_1 = 380V$; $V_2 = 220/127V$. Primário ligado em triângulo e secundário em estrela.

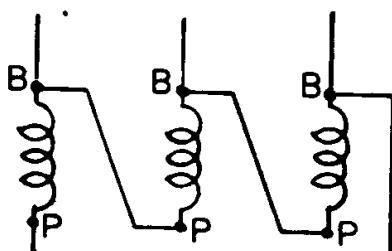
$$\begin{array}{l} \left| \begin{array}{l} \frac{2000}{3} = 670 \text{VA} \\ W_2 = 670 \cdot 1,1 = 737 \text{VA} \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} V_2 = 127 \\ V_1 = 380 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} I_2 = \frac{670}{127} = 5,27 \\ I_1 = \frac{737}{380} = 1,94 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} S_1 = \frac{5,27}{2,5} = 2,11; \text{ fio } 14 \text{ (2,087)} \\ S_2 = \frac{1,94}{2,5} = 0,78; \text{ fio } 18 \text{ (0,82)} \end{array} \right| \end{array}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{670}{50}} = 7,5 \sqrt{13,4} = 27,4 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 27,4 = 30 \text{ cm}^2$$

Seção do núcleo $a = 5$; $b = 6$

$$S_g = 5 \cdot 6 = 30; S_m = 27,4$$



$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{27,4} = 1,46$$

$$N_1 = 1,46 \cdot 380 = 555 \text{ espiras}$$

$$N_2 = 1,46 \cdot 127 \cdot 1,1 = 204 \text{ espiras}$$

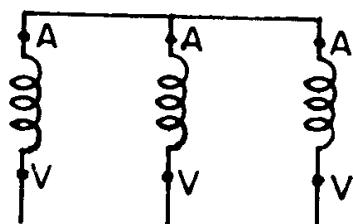


Fig. 104

N.B.: — A fim de melhor reconhecer o início e o fim de cada enrolamento, os terminais dos mesmos são feitos com fio de cor diferente, conforme fig. 105.

Estas diferentes cores facilitam a ligação das bobinas, conforme fig. 104.

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 555 \cdot 0,82 + \\ + 204 \cdot 2,087 = 455 + 426 = \\ = 881 \text{ mm}^2$$

$$S_j = 2 S_{cu} \cdot 3,5 = 2 \cdot 881 \cdot 3,5 = \\ = 6167 \text{ mm}^2$$

$$\text{Fixando } L_j = 5 \text{ cm} = 50 \text{ mm}^2$$

$$\text{resulta } H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{6167}{50} = \\ = 123 \text{ mm} = 12,3 \text{ cm.}$$

Executa-se a janela com
 $H_j = 13 \text{ cm.}$

As dimensões do núcleo resultam as indicadas na fig. 106.

$$\text{Peso do ferro } P_{fe} = \frac{(23 \cdot 25 - 2 \cdot 5 \cdot 13) \cdot 6 \cdot 0,9 \cdot 7,8}{1000} = 18,743 \text{ kg}$$

$$1m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2,5 + 2,6 + 0,5 \cdot 5 \cdot 3,14 = 29,85 = \sim 30 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{0,27 \cdot S_{cu} \cdot 1m}{1000} = \frac{0,27 \cdot 881 \cdot 30}{1000} = 7,136 \text{ kg}$$

$$\text{Perdas no ferro } W_{fe} = \omega_{fe} \cdot P_{fe} = 1,15 \cdot 1,72 \cdot 18,743 = 37 \text{ watts.}$$

$$\text{Perdas no cobre } W_{cu} = 2,43d^2 \cdot P_{cu} = 2,43 \cdot 2,5^2 \cdot 7,136 = 108 \text{ watts.}$$

$$\text{Perdas totais } W_{fe} + W_{cu} = 37 + 108 = 145$$

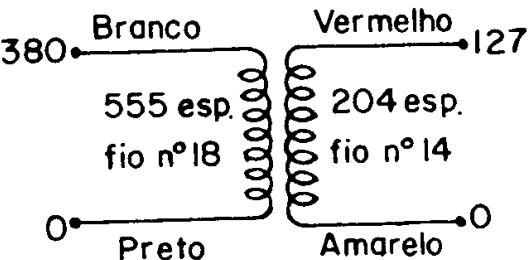


Fig. 105

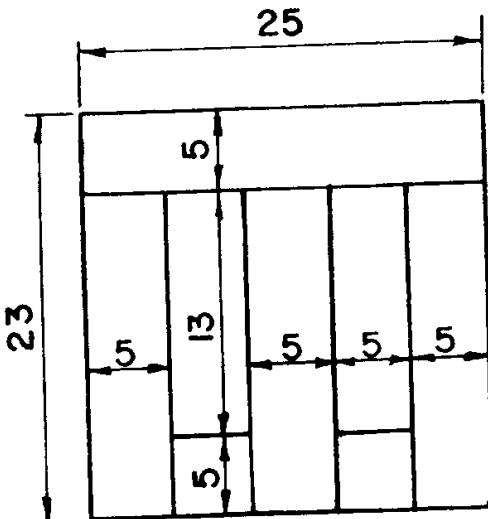


Fig. 106

$$\text{Rendimento } \mu = \frac{W_2}{W_2 + W_{fe} + W_{cu}} = \frac{2000}{2000 + 145} = 0,93$$

EXEMPLO N.^o 2

Transformador trifásico: $f = 50$ Hz; $W_{a2} = 1000$ VA; $V_1 = 380$ volts; $V_2 = 220/127$ volts; Primário ligado em triângulo e secundário em estrela.

$$W_2 = \frac{1000}{3} = 333 \quad \left| V_2 = 127 \right| I_2 = \frac{333}{127} = 2,62 \quad S_2 = \frac{2,62}{3} = 0,87 \text{ fio } 17 (1,04 \text{ mm}^2)$$

$$W_1 = 333 \cdot 1,1 = 366 \quad \left| V_1 = 380 \right| I_1 = \frac{366}{380} = 0,96 \quad S_1 = \frac{0,96}{3} = 0,32 \text{ fio } 22 (0,326 \text{ mm}^2)$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{333}{50}} = 19,4 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 19,4 = 21,4 \text{ cm}^2$$

Seção do núcleo $a = 4$; $b = 5$

$$S_g = 5 \cdot 4 = 20 \text{ cm}^2$$

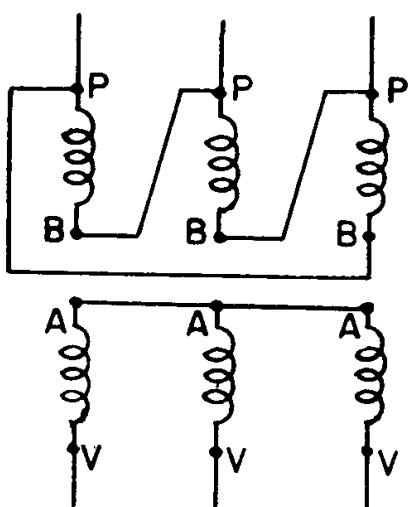


Fig. 107

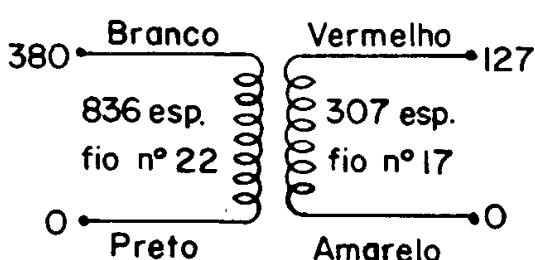


Fig. 108

$$S_m = \frac{20}{1,1} = 18,2 \text{ cm}$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{18,2} = 2,2$$

$$N_1 = 2,2 \cdot 380 = 836 \text{ esp.}$$

$$N_2 = 2,2 \cdot 127 \cdot 1,1 = 307 \text{ esp.}$$

$$S_{eu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 836 \cdot 0,326 + 307 \cdot 1,04 = 273 + 320 = 593 \text{ mm}^2$$

$$S_j = 2 \cdot S_{eu} \cdot 3,5 = 2 \cdot 593 \cdot 3,5 = 4151 \text{ mm}^2$$

Fixando $L_j = 4 \text{ cm} = 40 \text{ mm}$

$$H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{4151}{40} = 103,8 = \sim 104 \text{ mm}$$

Executa-se a janela com
 $H_j = 10,5 \text{ cm}$

Peso do ferro $P_{fe} = [20 \cdot 18,5 - 2 \cdot 10,5 \cdot 4] 5 \cdot 0,9 \cdot 7,8 = 10\,000 \text{ g} = 10 \text{ kg approx.}$

$$lm = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 4 + 2 \cdot 5 + 0,5 \cdot 4 \cdot 3,14 = 24,28 \text{ cm}$$

Peso total do cobre

$$P_{cu} = \frac{0,27 \cdot S_{cu} \cdot lm}{1000} = \frac{0,27 \cdot 593 \cdot 24,28}{1000} = 3,88 \text{ kg}$$

Perdas no ferro

$$W_{fe} = 1,15 \cdot 1,72 \cdot 10 = \sim 20 \text{ watts}$$

Perdas no cobre

$$W_{cu} = 2,7 \cdot d^2 \cdot P_{cu} = 2,43 \cdot 3^2 \cdot 3,88 = 85 \text{ watts.}$$

$$\text{Perdas totais} = 20 + 85 = 105 \text{ watts}$$

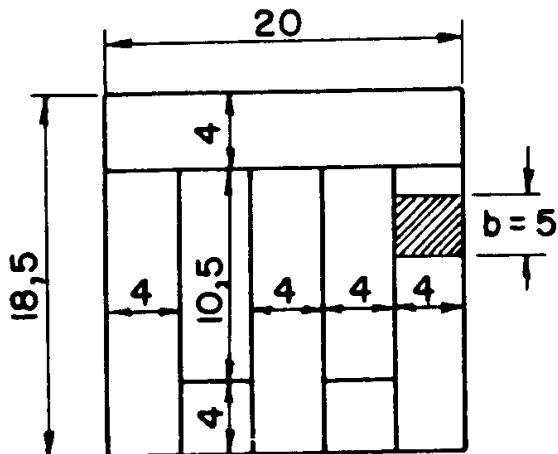


Fig. 109

$$\text{Rendimento } \mu = \frac{W_2}{W_2 + W_f + W_{cu}} = \frac{1000}{1000 + 105} = 0,9$$

34) TRANSFORMADOR ESPECIAL COM ENTRADA TRIFÁSICA E SAÍDA MONOFÁSICA

Quando uma carga monofásica constitui um desequilíbrio excessivo numa rede trifásica, é preciso recorrer a um dispositivo que permita distribuir a carga pelas três fases do sistema. O sistema mais simples que realiza esta distribuição da carga é o sistema de transformação constituído por dois transformadores monofásicos, idênticos, alimentados pela linha trifásica, conforme fig. 110.

Os bornes secundários A e B alimentam o circuito monofásico.

A tensão secundária total V_2 é obtida pela soma geométrica das tensões secundárias v_2' e v_2'' dos transformadores (1) e (2), conforme fig. 111.

Como estas duas tensões estão defasadas de 120° entre si, resulta:

$$V_2 = \sqrt{3} \cdot v_2 \text{ ou } v_2 = \frac{V_2}{\sqrt{3}}$$

N.B.: — Ao se conectarem os dois transformadores monofásicos, pode acontecer a in-

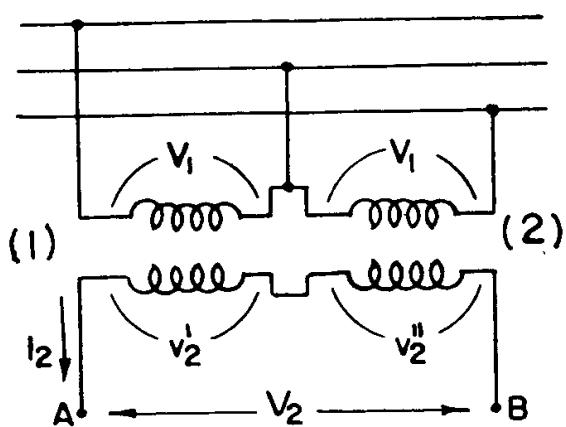


Fig. 110

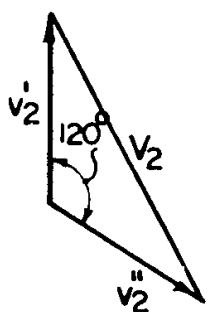


Fig. 111

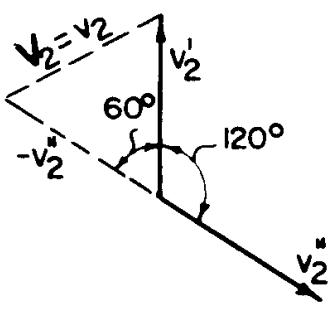


Fig. 112

versão acidental de uma das bobinas. Este fato é acusado pela medição da tensão V_2 , pois esta resulta igual a v_2 , conforme indica a fig. 112. A correção do inconveniente efetua-se invertendo-se a ligação de uma das bobinas, primária ou secundária, de um dos transformadores.

Se W_m é a potência do circuito monofásico, a corrente I_2 que alimenta o mesmo é fornecida por

$$I_2 = \frac{W_m}{V_2}$$

A corrente I_2 , assim calculada, atravessa o circuito secundário dos dois transformadores agrupados. A potência de saída de cada um destes transformadores é fornecida por:

$$W_2 = v_2 I_2$$

Conhecendo-se a potência W_2 , a tensão de saída v_2 , a corrente secundária I_2 e a tensão primária V_1 , cada transformador monofásico pode ser calculado pelas fórmulas relativas ao transformador monofásico.

É preciso, entretanto, lembrar que o conjunto requer dois transformadores idênticos oportunamente ligados entre si.

35) EXEMPLOS DE CÁLCULO DE TRANSFORMADORES ESPECIAIS COM ENTRADA TRIFÁSICA E SAÍDA MONOFÁSICA

EXEMPLO N.^o 1

Transformador trifásico-monofásico: $f = 50$ Hz; potência do circuito monofásico = 3000 VA; tensão do circuito monofásico = 440 volts; tensão da linha trifásica de alimentação = 220 volts. A corrente no circuito monofásico e nos circuitos secundários dos transformadores é fornecida por:

$$I_2 = \frac{3000}{400} = 6,84 \text{ A}$$

A tensão secundária de cada transformador resulta

$$v_2 = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254 \text{ V.}$$

A potência secundária de cada transformador é:

$$W_2 = v_2 I_2 = 254 \cdot 6,84 = 1740 \text{ VA}$$

Os dados de cada transformador monofásico são:

$$W_2 = 1740 \text{ VA}; V_2 = 254 \text{ V e } I_2 = 6,84 \text{ A}$$

Com estes dados calcula-se um dos transformadores necessários.

$$W_2 = 1740; V_2 = 254; I_2 = 6,84;$$

$$S_2 = \frac{6,84}{2} = 3,42;$$

fio 12 (AWG) (3,31)

$$W_1 = 1740 \cdot 1,1 = 1910; V_1 = 220;$$

$$I_1 = \frac{1910}{220} = 8,7; S_1 = \frac{8,7}{2} = 4,35; \text{fio 11 (AWG) (4,17)}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{1740}{50}} = 7,5 \sqrt{34,8} = 7,5 \cdot 5,9 = 44,25 \text{ cm}^2;$$

$$S_g = 44,25 \cdot 1,1 = 48,67 \text{ cm}^2$$

Seção do núcleo $a = 7$; $b = 7$;

$$S_g = 7 \cdot 7 = 49 \text{ cm}^2; S_m = \frac{49}{1,1} = 44,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{44,5} = 0,9$$

$$N_1 = 0,9 \cdot V_1 = 0,9 \cdot 220 = 198 \text{ esp.}$$

$$N_2 = 0,9 \cdot V_2 \cdot 1,1 = 0,9 \cdot 254 \cdot 1,1 = 250 \text{ esp.}$$

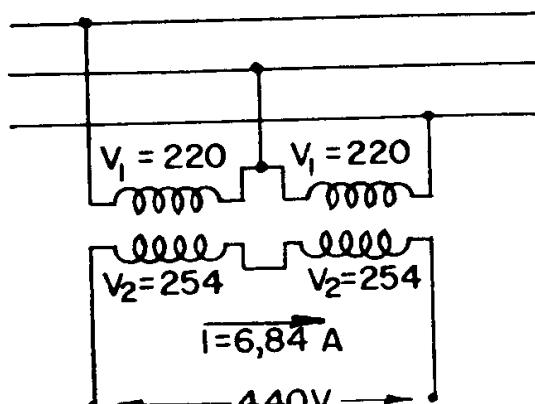


Fig. 113

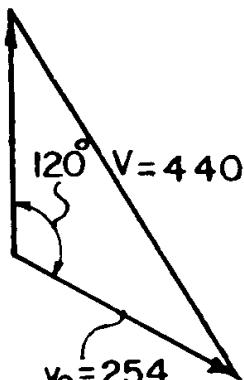


Fig. 114

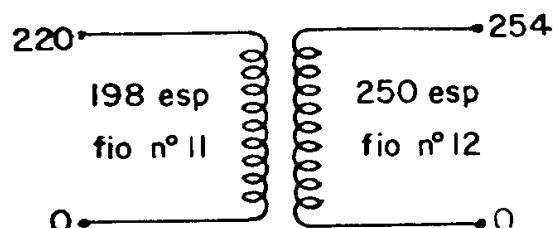


Fig. 115

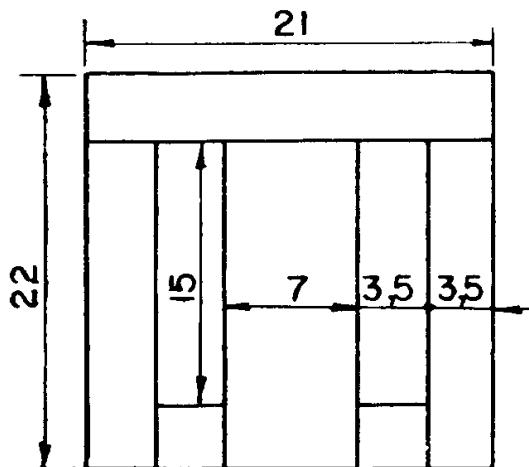


Fig. 116

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 198 \cdot 4,17 + 250 \cdot 3,31 = 826 + 828 = 1654 \text{ mm}^2$$

$$S_j = 1654 \cdot 3,2 = 5293 \text{ mm}^2$$

Fixando $L_j = 35 \text{ mm}$, resulta:

$$H_j = \frac{5293}{35} = 151 \text{ mm}$$

Executa-se a janela com altura de 15 cm.

$$\text{Peso do ferro } P_{fe} = (22 \cdot 21 - 2 \cdot 15 \cdot 3,5) 7 \cdot 0,9 \cdot 7,8 = 17542 \text{ g} = \sim 17,5 \text{ kg}$$

$$1m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 7 + 2 \cdot 7 + 0,5 \cdot 7 \cdot 3,14 = 39 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot 1m \cdot 9 = \frac{1654}{100} \cdot 39 \cdot 9 = 5805 \text{ g} = 5,8 \text{ kg}$$

N.B.: Devem ser fabricados dois transformadores com os valores obtidos do cálculo.

EXEMPLO N.^o 2

Transformadores trifásico-monofásico: $f = 50 \text{ Hz}$; potência do circuito monofásico = 300 VA; tensão do circuito monofásico = 24 volts; tensão da linha trifásica de alimentação = 380 volts.

Corrente no circuito monofásico e nos circuitos secundários dos transformadores:

$$I_2 = \frac{300}{24} = 12,5 \text{ A}$$

Tensão secundária de cada transformador:

$$v_2 = \frac{V_2}{\sqrt{3}} = \frac{24}{1,73} = 13,9$$

A potência secundária de cada transformador é:

$$W_2 = v_2 \cdot I_2 = 13,9 \cdot 12,5 = 173,75 \text{ VA}$$

$$\text{Potência primária } W_1 = 173,75 \cdot 1,1 = 191 \text{ VA}$$

$$I_1 = \frac{191}{380} = 0,5 \text{ A}$$

$$S_1 = \frac{I_1}{d} = \frac{0,5}{3} = 0,167; \text{ fio } 25 \\ (\text{AWG}) (0,159 \text{ mm}^2)$$

$$S_2 = \frac{I_2}{d} = \frac{12,5}{3} = 4,18; \text{ fio } 11 \\ (\text{AWG}) (4,17 \text{ mm}^2)$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{173,75}{50}} =$$

$$= 7,5 \sqrt{3,475} = 7,5 \cdot 1,86 = \\ = 13,95 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 13,95 = \\ = 15,34 \text{ cm}^2$$

Seção do núcleo $a = 4$; $b = 4$,
usa-se lâmina padronizada n.º 5.

$$S_g = 4 \cdot 4 = 16 \text{ cm}^2; S_m = \frac{S_g}{1,1} = \\ = \frac{16}{1,1} = 14,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{14,5} = 2,76$$

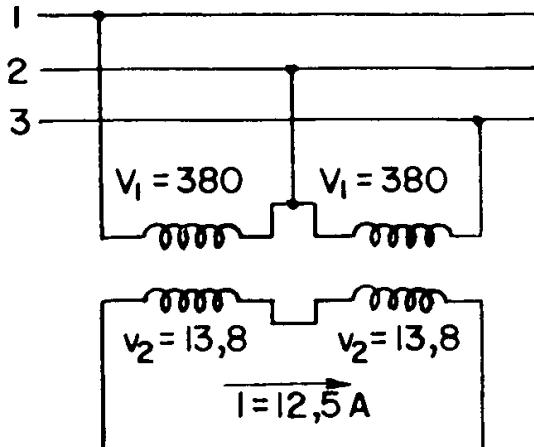


Fig. 117

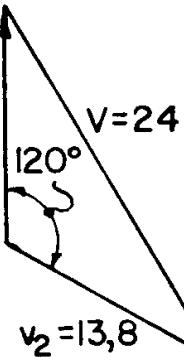


Fig. 118

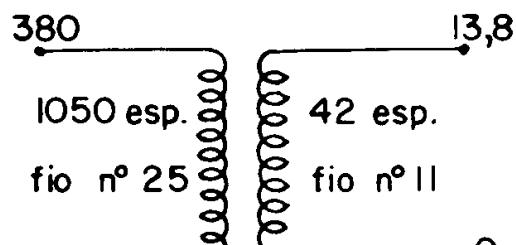


Fig. 119

$$N_1 = 2,76 \cdot V_1 = 2,76 \cdot 380 = 1050 \text{ esp.}$$

$$N_2 = 2,76 \cdot V_2 \cdot 1,1 = 2,76 \cdot 13,9 \cdot 1,1 = 42 \text{ esp.}$$

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 = 1050 \cdot 0,159 + 42 \cdot 4,17 = 167 + 175 = 342 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{cu}} = \frac{1200}{342} = 3,5. \text{ Execução possível.}$$

$$\text{Peso do ferro } P_{fe} = 0,674 \cdot 4 = 2,7 \text{ kg}$$

$$1m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 4 + 2 \cdot 4 + 0,5 \cdot 4 \cdot 3,14 = 22,28 \text{ mm}$$

$$P_{eu} = \frac{S_{eu}}{100} \cdot 1m \cdot 9 = \frac{342}{100} \cdot 22,28 \cdot 9 = 685 \text{ g.}$$

N.B.: Devem ser fabricados dois transformadores com os valores obtidos do cálculo.

36) NUMERAÇÃO DOS BORNES E RELAÇÃO DE FASE ENTRE AS TENSÕES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DOS TRANSFORMADORES

Os bornes de um transformador estão colocados geralmente sobre a tampa. Os de alta tensão de um lado e os de baixa tensão de outro.

Os terminais dos diversos enrolamentos devem ser marcados com as letras maiúsculas H, X, Y e Z. A letra H é reservada ao enrolamento de maior tensão. A seqüência das demais letras deve ser baseada na ordem decrescente das tensões nominais dos enrolamentos.

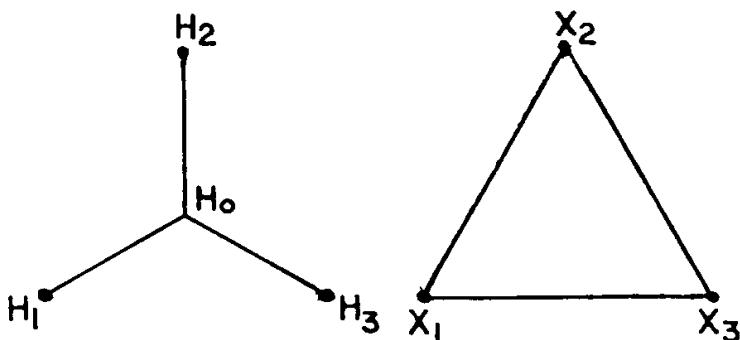


Fig. 120

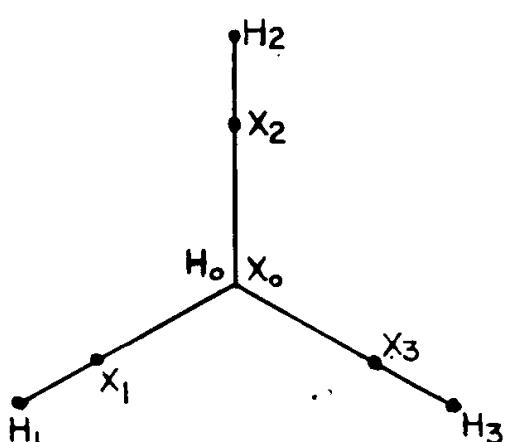


Fig. 121

As letras devem ser acompanhadas pelos números 0, 1, 2, 3 etc. para indicar, o primeiro deles, o terminal do neutro, e os outros as diferentes fases.

Pelo exposto a fig. 120 representa um transformador com o circuito A.T. ligado em estrela e o B.T. em triângulo. A fig. 121 representa o esquema de um autotransformador trifásico.

Com referência às letras aplicadas aos bornes, as normas exigem

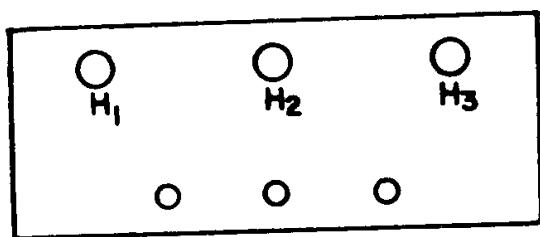


Fig. 122

que os bornes de A.T. sejam marcados da esquerda para direita de quem olha o transformador do lado dos bornes B.T., conforme fig. 122.

A marcação dos bornes de B.T. será feita obedecendo a relação de fase existente entre as tensões de A.T. e as de B.T.

Esta defasagem depende das conexões internas do transformador.

Nos transformadores monofásicos esta defasagem é nula ou de 180° ; nos trifásicos é nula ou múltipla de 30° .

a) *Transformadores monofásicos*

Nos transformadores monofásicos podem ocorrer dois fatos distintos, isto é, ou os dois enrolamentos A.T. e B.T. estão enrolados no mesmo sentido, conforme fig. 123 (a) ou enrolados um em sentido contrário ao outro, conforme fig. 123 (b).

As f.e.m. nas espiras dos dois enrolamentos possuem sempre sentidos concordes entre si, pois são geradas pelo mesmo fluxo. Examinando-se os enrolamentos e os respectivos bornes, observa-se que na fig. 123 (a) as duas f.e.m. A.T. e B.T. são dirigidas ambas para os bornes adjacentes H_1 e X_1 .

Na fig. 123 (b), pelo contrário, são dirigidas aos bornes opostos. No primeiro caso os bornes adjacentes possuem em cada instante a mesma polaridade.

No segundo caso, pelo contrário, possuem em cada instante polaridades contrárias, isto é, no primeiro caso as duas tensões E_1 e E_2 estão em fase entre si, enquanto no segundo caso são opostas, isto é, defasadas de 180° .

No que concerne ao sentido das correntes, é suficiente lembrar que, no enrolamento que funciona como primário, a corrente entra em sentido oposto à f.e.m. correspondente (a qual age como f.c.e.m.).

No enrolamento que funciona como secundário, pelo contrário, a corrente tem o mesmo sentido da f.e.m. que a produz.

Assim sendo, se os bornes adjacentes têm polaridades concordes como na fig. 123 (a) o sentido recíproco das correntes com respeito aos bornes é indicado pelo esquema da fig. 123 (c).

Se, pelo contrário, os bornes adjacentes têm polaridades contrárias, como na fig. 123 (b), as correntes primárias e secundárias adquirem o sentido recíproco indicado na fig. 123 (d). Esta inversão de polaridade dá a impressão de que no transformador a corrente sofreu a inversão indicada com a linha pontilhada.

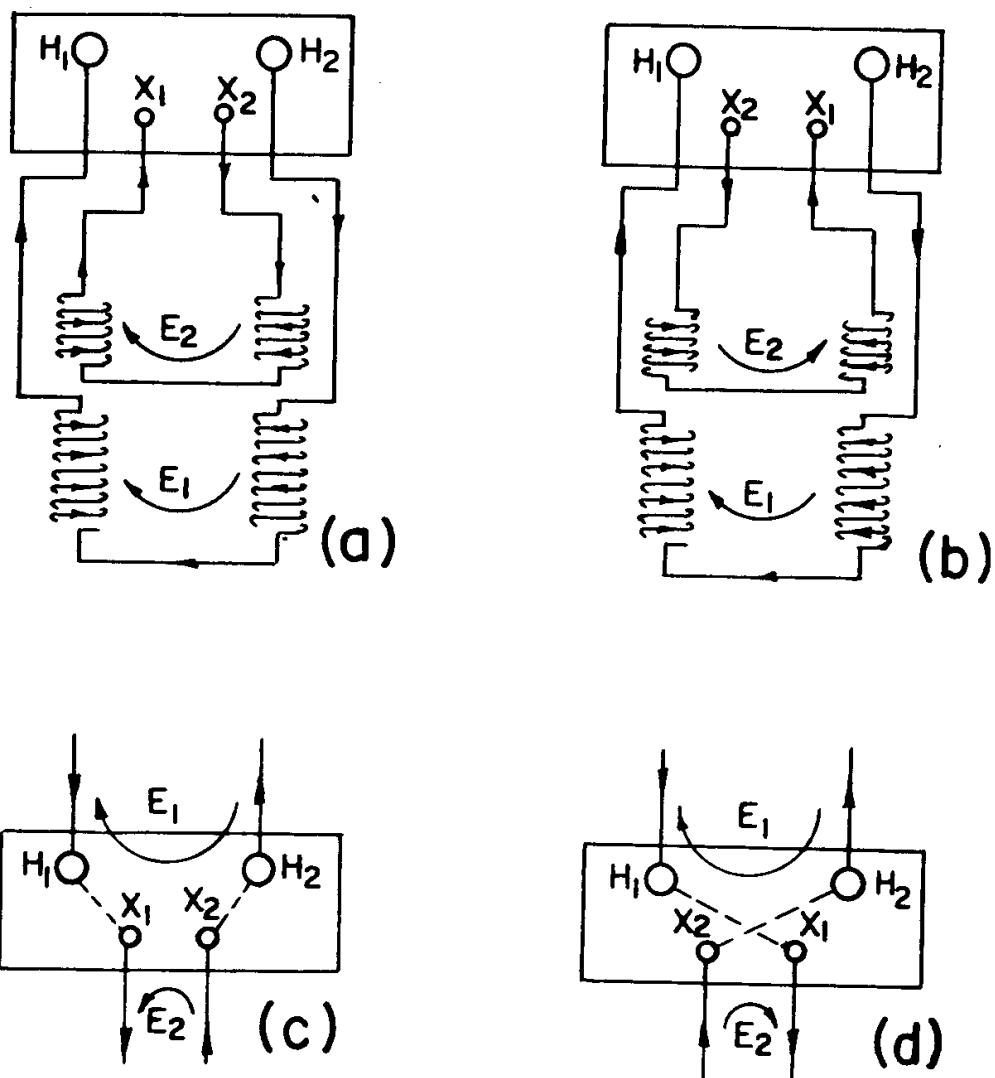


Fig. 123

Na prática, a polaridade de um transformador é definida pelas expressões "subtrativa" ou "aditiva". Para verificar-se o tipo de polaridade, por exemplo, de um transformador monofásico, conecta-se um terminal A.T. com o adjacente B.T., por exemplo H_1 com X_1 , conforme fig. 124.

Aplica-se tensão num dos circuitos, por exemplo a tensão V no circuito A.T. Se a tensão V_t , existente entre os outros terminais (H_2 e X_2) dos circuitos, for maior

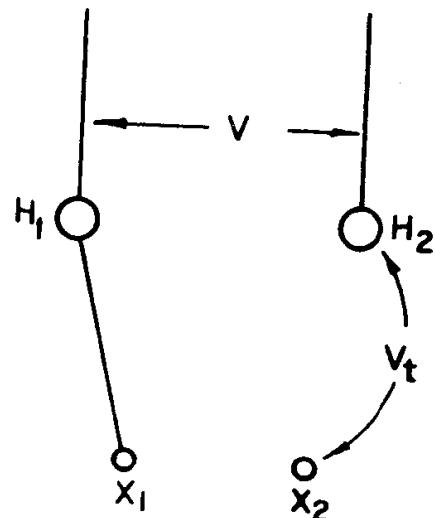


Fig. 124

que V_t se diz que a polaridade é aditiva. Se V_t for menor que V a polaridade é subtrativa.

Nos transformadores com polaridade subtrativa, conforme o da fig. 123 (a), os terminais H_1 e X_1 devem ser colocados adjacentes entre si.

Nos transformadores com polaridade aditiva, conforme o da fig. 123 (b), os terminais H_1 e X_1 devem ser colocados diagonalmente opostos.

Os transformadores monofásicos até 200 kVA, com classe de tensão de isolamento até 8,7 kV inclusive devem ter polaridade aditiva.

Os demais transformadores monofásicos devem ter polaridade subtrativa.

b) *Transformadores trifásicos*

Nos transformadores trifásicos podem ser aplicadas a cada fase as observações feitas com respeito aos monofásicos.

Em cada coluna as f.e.m. nos dois enrolamentos A.T. e B.T. resultam dirigidas no mesmo sentido (isto é, ambas dirigidas do extremo superior ao inferior ou vice-versa), se os dois enrolamentos estão enrolados no mesmo sentido. Terão sentidos contrários se os dois enrolamentos estão enrolados em sentido oposto. Nos transformadores trifásicos a relação de fase entre as tensões primárias e secundárias depende, além da polaridade concorde ou contrária das fases, também do esquema de agrupamento destas.

Chama-se de *deslocamento angular* do transformador o ângulo que define a posição recíproca entre o triângulo das *tensões concatenadas primárias* e o triângulo das tensões concatenadas secundárias.

Na construção destes triângulos usa-se indicar os vetores que representam as f.e.m. das várias fases com as mesmas letras que indicam os bornes respectivos, isto é, H_1 , H_2 , H_3 para a alta tensão e X_1 , X_2 , X_3 para a baixa tensão. Se as fases estão agrupadas em estrela, os três vetores relativos às três fases são colocados também em estrela a 120° um do outro e, então, o triângulo das tensões concatenadas tem por vértice os extremos destes vetores. Se pelo contrário, as fases são agrupadas em triângulo, os três vetores correspondentes são traçados um em seguida ao outro para compor diretamente o triângulo das tensões de linha, que neste caso coincide com as tensões de fase. Em todos os casos, os dois vetores relativos a duas fases enrolados sobre a mesma coluna deverão ser paralelos entre si. Poderão ser dirigidos no mesmo sentido ou em sentido contrário, conforme os bornes (tendo-se em consideração o sentido do enrolamento das respectivas fases) possuírem polaridades concordes ou contrárias.

Para tornar os vários diagramas diretamente confrontáveis, estabelece-se traçar primeiro o triângulo das tensões concatenadas A.T. com o vértice H_2 , relativo à fase central, para cima, o vértice H_1 em adiantamento e o H_3 em atraso.

As Normas Brasileiras P-EB-91 e P-MB-128 estabelecem que a utilização das fases dos transformadores trifásicos deve ser feita de forma que as f.e.m. atuantes nas fases de cada coluna possuam o mesmo sentido.

Com esta regra é fácil traçar os diagramas relativos aos diferentes tipos de conexões.

A fig. 125 representa dois exemplos de conexões, aos quais corresponde o deslocamento angular de 0° . O esquema da fig. 125 (a) é relativo à conexão estrela-estrela, com as f.e.m. no mesmo sentido, o que é comprovado pelo fato de as fases estarem enroladas no mesmo sentido e possuírem os centro-estrelas A.T. e B.T. colocados na parte inferior das respectivas fases.

Os vetores da fase (1) são dirigidos no mesmo sentido (H_1) e (X_1). Os dois triângulos ($H_1 H_2$ e H_3) e ($X_1 X_2$ e X_3) estão igualmente orientados e, portanto, as retas $H_o H_1$ e $X_o X_1$ estão em fase entre si. Correspondentemente, todas as tensões entre os bornes B.T. estão em fase com as correspondentes tensões existentes entre os bornes A.T. A transformação, pelo exposto, não produz nenhum deslocamento angular.

No esquema da fig. 125 (b) está indicado o agrupamento triângulo-triângulo.

Os vetores H_1 , H_2 e H_3 são traçados um em seguida ao outro a fim de formar o triângulo ($H_1 H_2$ e H_3) com o vértice H_2 para cima, conforme o estabelecido.

Havendo concordância de polaridade nas fases enroladas sobre a mesma coluna, os vetores X_1 , X_2 e X_3 deverão ser traçados ordenadamente paralelos e no mesmo sentido que os correspondentes H_1 , H_2 e H_3 , a fim de formar um triângulo.

Observa-se que o triângulo ($X_1 X_2 X_3$) está em concordância de fase com o ($H_1 H_2 H_3$), pois as retas $H_o H_1$ e $X_o X_1$ estão dirigidas no mesmo sentido. Pelo exposto a transformação não produz nenhum deslocamento angular entre as tensões concatenadas A.T. e as B.T.

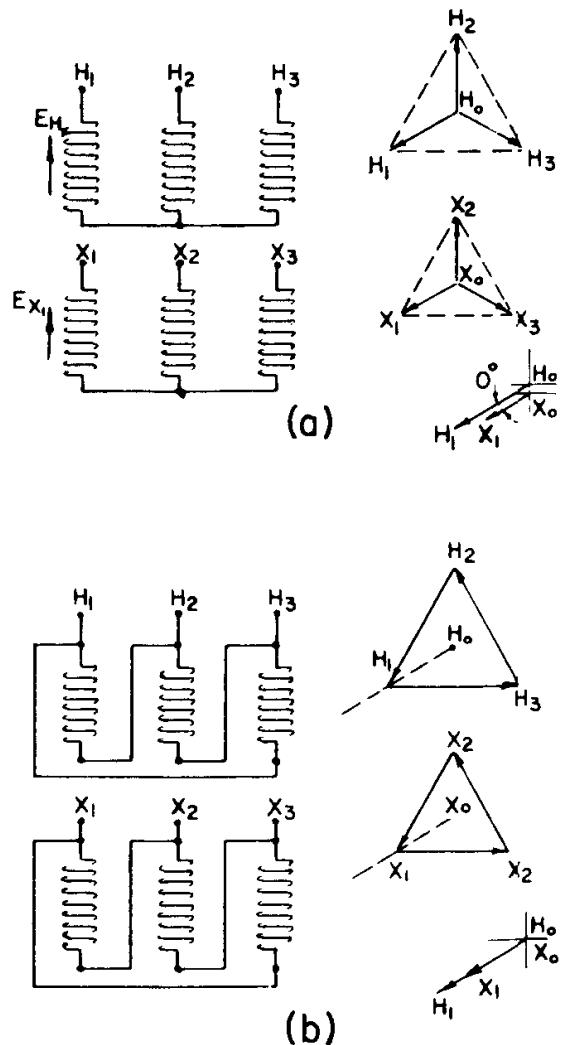


Fig. 125

Na fig. 126 estão representados dois exemplos de conexões que apresentam o deslocamento angular de 30° .

O esquema da fig. 126 (a) é relativo à conexão estrela-triângulo. As f.e.m. das fases A.T. são representadas pelos vetores H_1 ; H_2 ; H_3 . A f.e.m. na fase 2 do circuito B.T. é representada pelo vetor X_2 , traçado no mesmo sentido do H_2 . Os demais vetores X_1 e X_3 são traçados respeitando as conexões das bobinas B.T., obtendo-se o triângulo (X_1 X_2 X_3).

A orientação do referido triângulo apresenta o deslocamento de 30° com referência à estrela que representa as f.e.m. A.T. pois entre as retas X_0X_1 e H_0H_1 existe o deslocamento de 30° .

A transformação, pelo exposto, provoca o deslocamento de 30° entre as tensões primárias e secundárias.

No esquema da fig. 126 (b) está representado o agrupamento triângulo-estrela.

Os vetores H_1 ; H_2 ; H_3 são traçados um em seguida ao outro a fim de obter-se o triângulo ($H_1 H_2 H_3$). Os vetores X_1 ; X_2 ; X_3 são traçados paralelos e no mesmo sentido das fases A.T. O triângulo ($H_1 H_2 H_3$) apresenta o deslocamento de 30° com relação à estrela X_1 ; X_2 ; X_3 pois entre as retas H_0H_1 e X_0X_1 existe o deslocamento de 30° .

Tanto no agrupamento da fig. 126 (a) como no da fig. 126 (b) verifica-se o deslocamento de fase 30° em atraso de todas as tensões medidas entre os bornes B.T. com respeito às tensões análogas entre os bornes A.T.

Como regra geral pode-se dizer que o deslocamento angular entre os bornes A.T. e B.T. é medido pelo ângulo compreendido entre as duas retas H_0H_1 e X_0X_1 definidas pelos vértices correspondentes H_1 e X_1 e pelos centros H_0 e X_0 dos triângulos.

Desejando considerar todas as combinações possíveis, mesmo as que são obtidas enrolando as fases de cada coluna em sentido contrário, obter-se-ão deslocamentos angulares de: 0° ; 30° ; 180° e 210° . As Normas Brasileiras, entretanto, estipulam que sejam utilizados unicamente os agrupamentos que proporcionam os deslocamentos angulares de 0° e

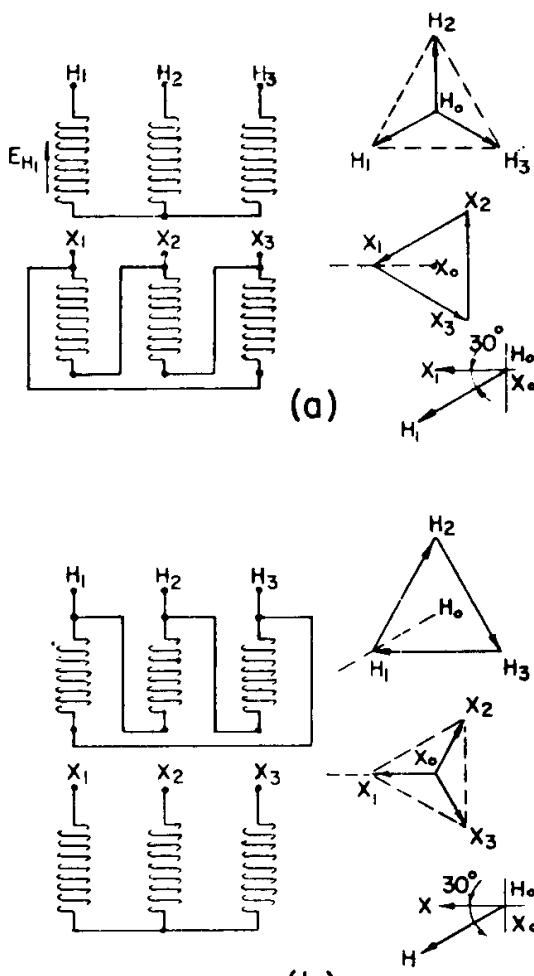


Fig. 126

de 30° . Cada um destes grupos é convencionalmente designado por um número. Assim os esquemas de conexão que possuem o deslocamento angular nulo (0°) constituem o "Grupo 1" e os esquemas de conexão que possuem o deslocamento angular de 30° constituem o "Grupo 2".

Na fig. 127 estão representados os principais esquemas utilizados nos transformadores trifásicos, compreendidos nos grupos 1 e 2.

A fig. 127 indica também o processo de marcação das ligações e a designação dos grupos, conforme as normas alemãs VDE.

Nas normas VDE, obtém-se a designação convencional dos esquemas indicando-se primeiramente a ligação das fases A.T. com as letras Y, D, Z, respectivamente para estrela, triângulo e ziguezague. A esta indicação segue a das fases B.T. com as mesmas letras em tipo minúsculo, seguida pelo número do grupo.

Assim, por exemplo, a sigla D z 0 indica o esquema do grupo "0" que nas Normas Brasileiras corresponde ao esquema que possui as fases A.T. ligadas em triângulo e as fases B.T. em ziguezague.

A sigla Y d 11 indica o esquema do grupo "11", correspondendo nas Normas Brasileiras ao esquema que possui as fases A.T. agrupadas em estrela e as fases B.T. agrupadas em triângulo.

A designação do grupo ao qual pertence cada transformador é praticamente indispensável para estabelecer a possibilidade ou impossibilidade do funcionamento em paralelo com outros transformadores. Para que dois transformadores alimentados pela mesma linha primária possam ser agrupados em paralelo entre si sobre a mesma linha secundária, é necessário que as tensões secundárias fornecidas separadamente pelos dois transformadores sejam iguais e estejam em fase entre si. Isto quer dizer que o agrupamento em paralelo é possível somente entre transformadores pertencentes ao mesmo grupo, sendo, pelo contrário, impossível entre transformadores pertencentes a grupos diferentes.

Por isso os construtores indicam na placa de cada transformador o esquema das ligações internas com a numeração dos bornes e a designação do grupo.

37) AGRUPAMENTO DOS TRANSFORMADORES EM PARALELO

Dois ou mais transformadores são agrupados em paralelo entre si quando recebem a energia da mesma linha primária para transferi-la com a tensão transformada sobre a mesma linha secundária.

No caso de dois transformadores o esquema das ligações dos bornes adquire a forma indicada na fig. 128. O funcionamento em paralelo de dois transformadores é perfeito quando a potência total fornecida à linha secundária se divide espontaneamente entre os dois transformadores em partes proporcionais às respectivas potências. Se os transfor-

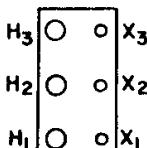
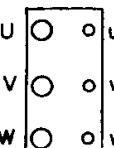
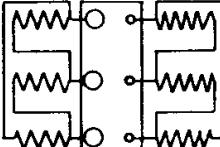
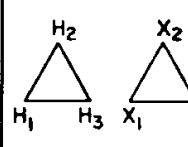
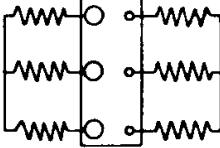
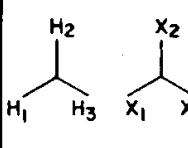
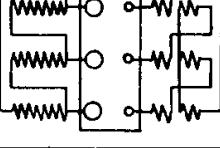
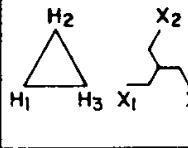
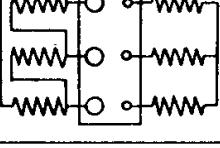
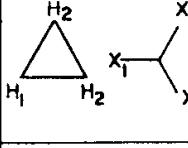
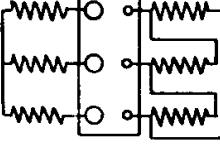
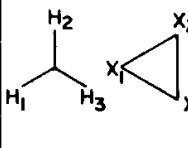
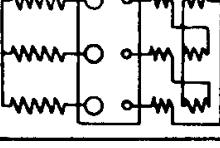
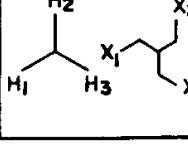
MARCAÇÃO DOS TERMINAIS DOS TRANSFORMADORES TRIFÁS.					
 De acordo com as especificações brasileiras EB-91			 De acordo com as especificações alemãs VDE.		
LIGAÇÕES USUAIS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS					
Ligaçāo dos enrolamentos	Diagrama das ligações		De acordo com as especificações EB-91	De acordo com as especificações VDE	
AT.	BT.			Esquema de ligações	Defasamento
Triângulo	Triângulo	D	D		 0°
Estrela	Estrela	Y	Y		 0°
Triângulo	Zig-Zag	D	Z		 0°
Triângulo	Estrela	D	Y		 30°
Estrela	Triângulo	Y	D		 30°
Estrela	Zig-Zag	Y	Z		 30°

Fig. 127

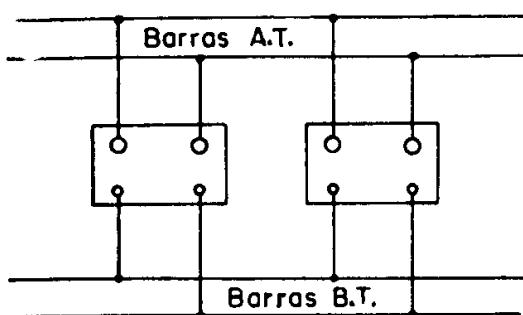


Fig. 128

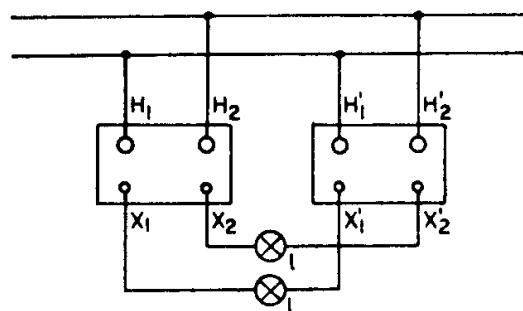


Fig. 129

Para os transformadores monofásicos, a concordância de fase entre as tensões secundárias depende somente da escolha acertada dos bornes. O paralelo a vazio entre dois transformadores monofásicos é sempre possível, desde que os dois transformadores sejam construídos pela mesma tensão primária e possuam a mesma relação de transformação a vazio, quer dizer, a mesma relação de espiras.

A determinação dos bornes correspondentes pode ser feita praticamente com duas lâmpadas ou eventualmente com dois voltímetros derivados entre os transformadores, como indica a fig. 129.

Se as lâmpadas ficam apagadas, os bornes sobre as quais estão derivados podem ser agrupados entre si. Se, pelo contrário, as lâmpadas se acendem, quer dizer que os bornes considerados possuem polaridades contrárias. Neste caso é suficiente executar a inversão das ligações sobre um ou outro transformador.

Para os transformadores trifásicos, a relação de fase entre as tensões secundárias fornecidas pelos dois transformadores depende, como já foi visto, além da ordem em que se consideram os bornes, também do esquema das ligações internas. Se os dois transformadores são alimentados pelas mesmas tensões primárias, as tensões secundárias fornecidas pelos dois transformadores resultarão em fase somente quando os dois transformadores possuírem o mesmo deslocamento angular entre a alta e a baixa tensão, isto é, pertencerem ao mesmo grupo. Para poder executar o agrupamento em paralelo entre dois transformadores trifá-

madores são de igual potência, a carga se divide em partes iguais entre os mesmos.

Para realizar esta divisão é necessário que no funcionamento a vazio, isto é, quando a linha secundária não possui carga alguma, entre os transformadores agrupados não se verifique nenhuma troca de corrente.

Esta condição é alcançada quando as tensões secundárias a vazio, fornecidas separadamente pelos dois transformadores, possuem o mesmo valor e estejam exatamente em concordância de fase entre si. Neste caso, entre os bornes secundários correspondentes, que devem ser agrupados, não existe nenhuma diferença de potencial e o agrupamento não determina nenhuma troca de corrente.

sicos é, então, necessário: que sejam construídos para a mesma tensão primária, que possuam a mesma relação de transformação e que as respectivas ligações internas pertençam ao mesmo grupo. Se estas condições são satisfeitas entre os bornes secundários correspondentes dos dois transformadores, não existe diferença alguma de potencial. Assim sendo, executando-se o agrupamento, nenhuma troca de corrente se verifica e o paralelo a vazio é perfeito.

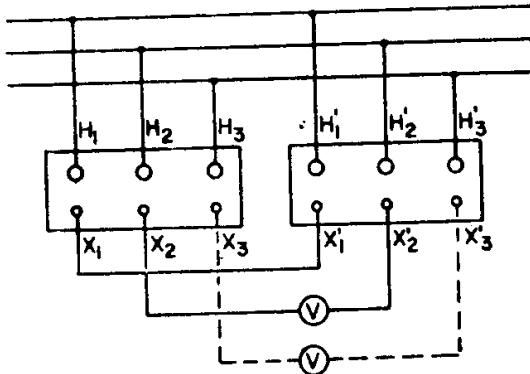


Fig. 130

agrupamento dos dois bornes não pode provocar inconveniente algum, mesmo que eles não se correspondam, pois o circuito fica aberto.) Com um voltímetro, mede-se então a tensão entre os outros dois pares de bornes como x_2x_2' e x_3x_3' . Se o voltímetro indica zero, os bornes correspondentes podem ser agrupados entre si, isto é, x_1 com x_1' , x_2 com x_2' e x_3 com x_3' .

Se, pelo contrário, o voltímetro nas duas medidas indica certa tensão (que pode ser também o duplo da fornecida por cada transformador) é preciso repetir a medida com as tomadas cruzadas, isto é, agrupando x_2 com x_3' e x_3 com x_2' . Se agora o voltímetro indicar zero, as tomadas correspondentes são x_1 com x_1' , x_2 com x_3' e x_3 com x_2' . Se também no segundo ensaio o voltímetro não indicar zero, quer dizer que os dois bornes x_1 e x_1' , entre os quais se estabelece a ligação, não são correspondentes. Dever-se-á então repetir o ensaio, estabelecendo-se outro agrupamento direto; por exemplo, entre x_1 e x_2' até localizar os pares de bornes entre os quais não existe diferença alguma de potencial. Se, efetuando-se todas as possíveis ordens de agrupamento das tomadas, a condição de agrupamento nunca se verificar, quer dizer que os dois transformadores possuem deslocamento angular diferente um do outro, isto é, pertencem a dois grupos diferentes e o agrupamento em paralelo é impossível.

Uma vez executado o agrupamento em paralelo entre os dois transformadores, é necessário ainda controlar se a divisão da carga entre um e outro se verifica de maneira apropriada.

A determinação dos bornes correspondentes pode ser feita também pelos transformadores trifásicos, com lâmpadas ou com voltímetros. Procede-se, praticamente, da seguinte maneira: ligam-se primeiro as tomadas A.T. dos dois transformadores sobre a mesma linha primária (que pode ser também com tensão reduzida), como indica a fig. 130. Ligam-se diretamente entre si dois bornes que, supõe-se, devem corresponder-se, como por exemplo x_1 e x_1' . (O

Esta divisão não pode ser feita à vontade, como acontece nos alternadores, mas depende unicamente das características de construção dos transformadores agrupados.

Se estes possuem a mesma potência de placa, podem repartir a carga em partes iguais somente quando, fornecendo a mesma corrente, apresentam a mesma queda de tensão, isto é, quando as características externas dos transformadores agrupados resultam exatamente iguais. Isto requer que sejam iguais a resistência e a reatância equivalente dos transformadores e, portanto, os respectivos triângulos fundamentais. Esta condição é alcançada quando os transformadores possuem a mesma tensão e o mesmo fator de potência de curto-circuito V_{1cc} e $\cos\phi_{1cc}$.

Se um deles possuir uma tensão de curto-circuito menor que o outro, quer dizer que este possui também menor impedância equivalente. Quando estes transformadores estiverem agrupados, a tensão secundária será necessariamente a mesma; se as respectivas tensões a vazio são iguais, em cada um destes deve produzir-se a mesma queda de tensão.

A corrente total fornecida divide-se entre dois transformadores em razão inversa das respectivas impedâncias equivalentes. O transformador que possuir a menor impedância, para ter a mesma queda interna de tensão, é forçado a fornecer uma corrente maior do que o outro.

Quando, pelo contrário, se agrupam em paralelo dois transformadores de potência diferente, o funcionamento do grupo é regular se a carga se subdivide em proporção às respectivas potências. Neste caso o transformador de menor potência deve ter maior impedância que o outro e precisamente os triângulos fundamentais dos dois transformadores devem estar entre si em razão inversa das potências de placa dos dois transformadores. Também neste caso devem ser iguais entre si a tensão e o fator de potência de curto-circuito dos transformadores; (é oportuno lembrar que a tensão de curto-circuito se refere à corrente de plena carga de cada transformador).

Resumindo os fatos expostos, pode-se dizer que o funcionamento em paralelo de dois transformadores é perfeito, seja a vazio ou com carga, quando possuem a mesma relação de transformação a vazio, a mesma tensão e o mesmo fator de potência de curto-circuito. Para os transformadores trifásicos é também indispensável que possuam o mesmo deslocamento angular entre a alta e a baixa tensão, isto é, pertençam ao mesmo grupo.

Praticamente estas condições nunca são exatamente satisfeitas a não ser no caso em que se trata de transformadores perfeitamente iguais, isto é, com idêntica construção elétrica e magnética. Se, porém, a diferença entre as características dos transformadores não é excessiva, o funcionamento em paralelo é ainda possível, mas é preciso que o desequilíbrio de regime resultante seja tolerável e não provoque uma sobrecarga muito grande num dos transformadores em relação ao outro.

**38) DETERMINAÇÃO DO REGIME DE FUNCIONAMENTO
EM PARALELO DE DOIS TRANSFORMADORES COM
CARACTERÍSTICAS DIFERENTES**

A determinação do regime de funcionamento de dois transformadores agrupados em paralelo, tendo características diferentes, pode ser feita facilmente, considerando-se os respectivos circuitos equivalentes secundários, agrupados entre si em paralelo como indica a fig. 131. Considere-se primeiro o caso de dois transformadores com a mesma resistência e a mesma reatância equivalente R_e e X_e que possuem uma diferente relação de espiras.

Seja por exemplo $m' < m''$. Resulta então

$$E'_o = \frac{V_1}{m'} > E''_o = \frac{V_1}{m''}$$

Na malha fechada pelos dois circuitos secundários agrupados, estabelece-se então uma corrente de circulação I_c dada por $I_c = \frac{E'_o - E''_o}{2 Z_e}$ sendo $Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}$. Esta corrente é fornecida pelo primeiro transformador e absorvida pelo segundo. O enrolamento primário do primeiro transformador absorve

por reação uma corrente $I'_c = \frac{I_c}{m'}$, enquanto o enrolamento primário

do segundo fornece uma corrente $I''_c = \frac{I_c}{m''}$: sendo $m' < m''$ resulta

$I'_c > I''_c$. Assim sendo, a corrente I''_c , que é fornecida pelo primário do segundo transformador, é totalmente absorvida pelo primeiro, o qual além desta corrente absorve da linha de alimentação a diferença $(I'_c - I''_c)$. Em virtude destas correntes de circulação entre os dois transformadores (às quais se sobrepõem as correntes a vazio que são individualmente absorvidas pelos próprios transformadores), as tensões secundárias resultam iguais. Absorvendo-se dos bornes secundários certa corrente I_2 , tendo os dois transformadores a mesma impedância, esta divide-se em duas partes iguais, sobrepondo-se às correntes de circulação antes mencionadas.

Assim o primeiro transformador (isto é, o que possui a vazio uma tensão secundária maior) fornece no total uma corrente I'_2 igual à soma geométrica $\bar{I}'_2 = \bar{I}_c + \bar{I}_2/2$ enquanto o segundo fornece uma corrente I''_2 igual à diferença geométrica $\bar{I}''_2 = \bar{I}_2/2 - \bar{I}_c$ tendo-se presente que a corrente de circulação é defasada do ângulo definido por $\tan \phi_{cc} = \frac{X_e}{R_e}$.

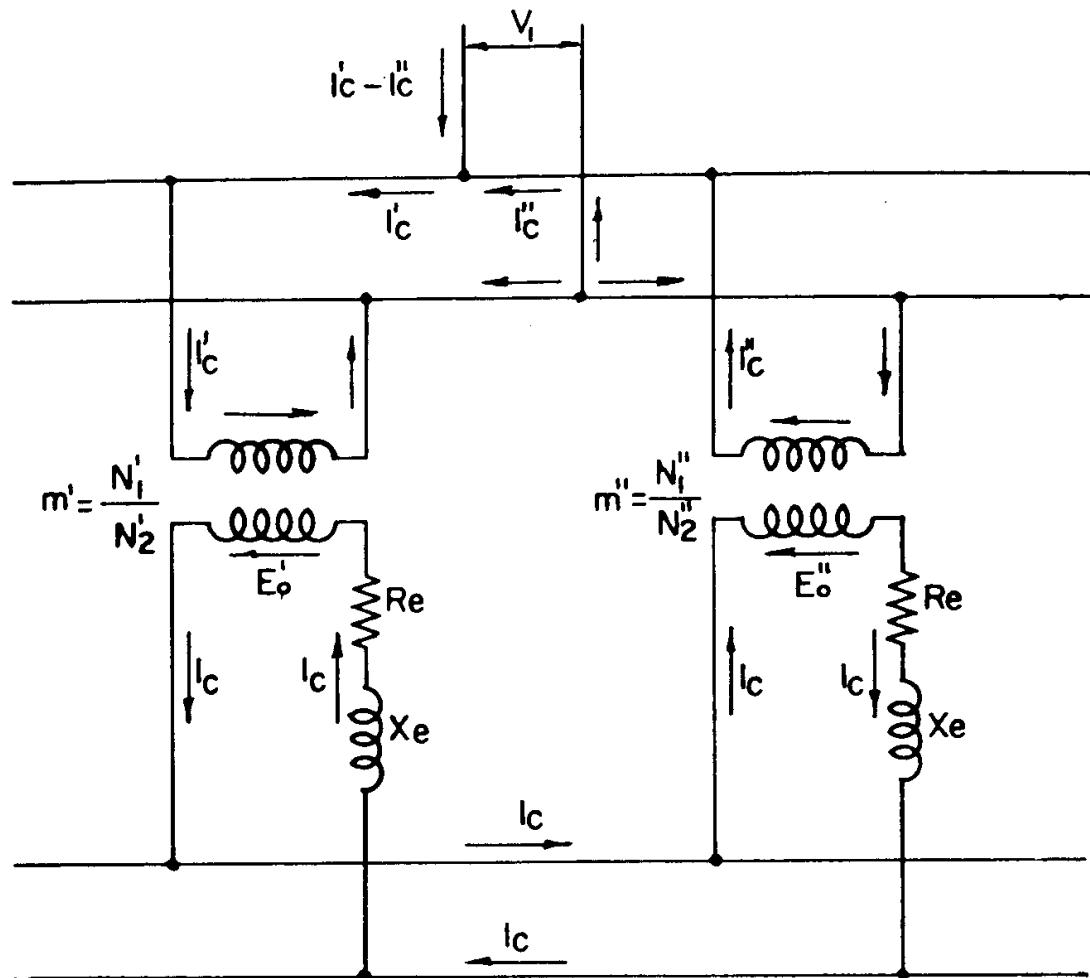


Fig. 131

Praticamente, uma corrente de circulação entre dois transformadores pode tolerar-se quando resulta da mesma ordem da corrente a vazio. Se a diferença entre a tensão a vazio de dois transformadores ($E_o' - E_o''$), reduzida em percentagem, resultasse igual ao valor percentual da tensão de curto-circuito (referido à corrente de plena carga), a corrente de circulação I_c alcançaria uma intensidade igual à metade da **corrente de plena carga**, o que seria absolutamente intolerável. Querendo-se que a corrente de circulação resulte da mesma ordem da corrente a vazio (cerca de 10% da corrente de plena carga) poder-se-á então admitir como máximo uma diferença entre as tensões a vazio dos transformadores a serem agrupados de cerca de 1/5 da respectiva tensão de curto-círcuito.

Se a diferença entre as tensões for maior que a mencionada, querendo efetuar-se o agrupamento em paralelo dos dois transformadores, é preciso tornar iguais as relações de transformação por meio da exclusão de algumas espiras do transformador que tem maior tensão. Esta operação deve ser feita pelo construtor.

Considere-se agora o caso de dois transformadores de igual potência, que possuem a mesma tensão a vazio, mas diferente impedância interna: imagine-se que os triângulos fundamentais dos dois transformadores possuem a forma indicada na fig. 132 (a). Observa-se que os dois ângulos ϕ_{ee}' e ϕ_{ee}'' correspondem precisamente à defasagem de curto-círcuito de um e de outro transformador. Carregando-se os dois transformadores agrupados, as respectivas correntes fornecidas, I' e I'' , devem ser tais que possam determinar a mesma queda interna, isto é, deve resultar:

$$Z_e' I' = Z_e'' I''$$

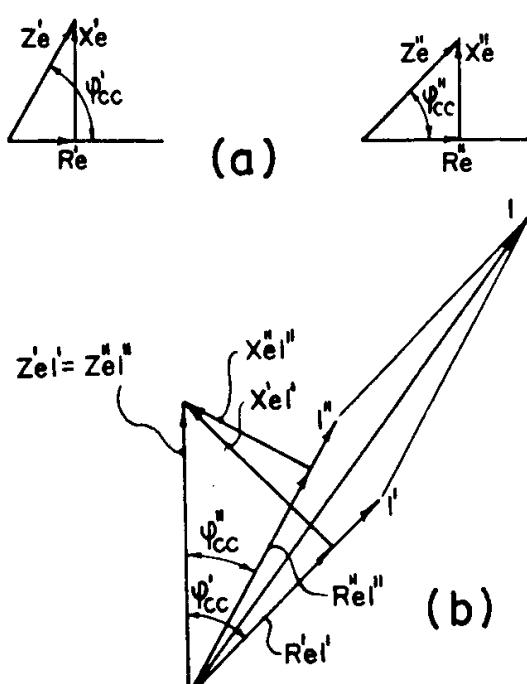


Fig. 132

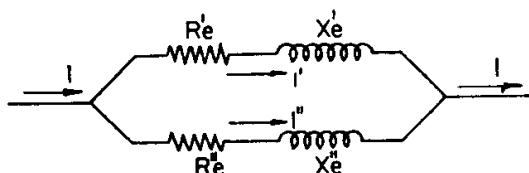


Fig. 133

entre as duas impedâncias. É preciso tornar iguais, separadamente, a resistência ôhmica e a reatância dos dois lados do arco duplo. No caso dos dois triângulos fundamentais representados na fig. 132 (a), seria necessário ligar em série uma resistência ôhmica ao primeiro transformador, igual à diferença ($R''_e - R'_e$) e uma reatância ao segundo, igual à diferença ($X'_e - X''_e$).

enquanto a corrente total que constitui a carga do grupo fica definida pela resultante $I = I' + I''$. A carga divide-se então entre os dois transformadores, conforme indica o diagrama da fig. 132 (b); as correntes fornecidas pelos dois transformadores adquirem valores que estão entre si na razão inversa das respectivas impedâncias. Estas duas correntes apresentam uma com respeito à outra a defasagem ($\phi_{ee}' - \phi_{ee}''$) igual à diferença entre as defasagens de curto-círcuito dos dois transformadores.

Independentemente da tensão nos bornes, pode-se dizer que a corrente de carga I divide-se entre os dois transformadores como entre os lados de um arco duplo realizado com as duas impedâncias equivalentes dos transformadores, conforme indica a fig. 133. É possível obter-se uma divisão por igual da corrente, agrupando-se em série ao transformador com a impedância menor uma reatância apropriada (bobina enrolada sobre núcleo de ferro) que compensa a diferença

Estas impedâncias de compensação podem ser inseridas indiferentemente do lado da alta tensão ou do lado da baixa tensão, conforme resultar mais cômodo, no que se refere à construção. Naturalmente o valor em ohms é diferente nos dois casos e passa-se de um para o outro caso com a conhecida regra da transformação das impedâncias secundárias transferidas para primário, isto é, dividindo-se pelo quadrado da relação das espiras.

A capacidade em ampère em todos os casos deve ser proporcional à corrente de plena carga do transformador.

Quando se quer determinar o estado de regime em paralelo de dois transformadores que além de diferente tensão a vazio possuem impedância diferente (isto é, uma diferente tensão de curto-círcuito) podem-se resolver separadamente as questões inerentes ao funcionamento a vazio e a relativa à divisão da corrente de carga. Primeiro determina-se a corrente de circulação a vazio I_c e depois a divisão da corrente I nos dois lados do arco duplo antes definido I' e I'' , para proceder-se enfim à composição das correntes I'_c , I' e I'' (a soma geométrica em um e a diferença geométrica no outro).

Quando se trata de transformadores trifásicos, pode-se considerar o circuito equivalente de uma fase; não é necessário para isto conhecer a ligação interna, pois se pode sempre considerar indiferentemente um esquema qualquer.

39) CURTO-CIRCUITO ACIDENTAL E PODER DE ROTURA DA CHAVE DE PROTEÇÃO

A chave de proteção tem por finalidade interromper o circuito alimentado pelo transformador, quando a corrente no mesmo adquire valores superiores aos admitidos.

O ponto crítico de uma chave de proteção é a interrupção feita em caso de curto-círcito acidental, pois em tais condições a corrente a ser interrompida é a máxima possível. No caso de curto-círcito, o único obstáculo que se opõe à f.e.m. secundária é a impedância interna do transformador, que, sendo pequena, determina a circulação de uma corrente muito intensa.

Em geral os construtores não indicam na placa do transformador o valor da impedância equivalente do mesmo. Este valor, entretanto, pode ser facilmente calculado com o auxílio do valor da tensão de curto-círcuito do transformador, que em geral está indicado na placa do mesmo, sob forma de percentagem da tensão nominal. Esta percentagem varia entre 3 e 8%.

A impedância equivalente, por exemplo, secundária é fornecida pela relação

$$Z''_e = \frac{V''_{cc}}{I_2}$$

Se o transformador sofrer um curto-círcuito acidental, à f.e.m. secundária E_2 se contrapõe unicamente a impedância equivalente secundária Z''_e . A corrente de curto-círcuito será dada por

$$I'_{ee} = \frac{E_2}{Z''_e} = \sim \frac{V_2}{Z''_e}$$

Evidentemente a chave de proteção deverá ser capaz de interromper a corrente I''_{ee} sem que os seus contatos sejam destruídos em poucas interrupções.

A título de exemplo, calcula-se a capacidade de interrupção da chave protetora do transformador monofásico com as seguintes características:

$$W_2 = 5000 \text{ VA}; V_1 = 6000 \text{ volts}; V_2 = 220 \text{ volts}; V_{ee} = 4\%$$

$$\text{Corrente secundária } I_2 = \frac{5000}{220} = 22,72 \text{ A}$$

Tensão secundária de curto-círcuito

$$V''_{ee} = \frac{220 \cdot 4}{100} = 8,8 \text{ volts}$$

Impedância equivalente secundária

$$Z''_e = \frac{V''_{ee}}{I_2} = \frac{8,8}{22,72} = 0,387 \text{ ohms}$$

$$\text{Corrente de curto-círcuito } I''_{ee} = \frac{V_2}{Z''_e} = \frac{220}{0,387} = 568 \text{ A}$$

A chave de proteção terá de interromper a corrente de 568 Ampères sem que seus contatos fiquem estragados.

Os fabricantes das chaves automáticas, além das demais características, indicam a "Capacidade de Interrupção" de cada chave, que se refere à corrente que a mesma pode interromper em caso de curto-círcuito, sem ficar danificada.

Em se tratando de transformador trifásico, o processo de avaliação da corrente de curto-círcuito é análogo ao monofásico, pois deve ser aplicado a uma das fases do mesmo.

A título de exemplo, calcula-se a corrente de curto-círcuito do transformador trifásico com as seguintes características:

$$W_2 = 60 \text{ kVA}; V_1 = 6000 \text{ volts}; V_2 = 220 \text{ volts}$$

Primário conectado em triângulo; secundário conectado em estrela;
 $V_{ce} = 3\%$.

$$\text{Potência por fase: } W_t = \frac{W_2}{3} = \frac{60\,000}{3} = 20\,000 \text{ VA.}$$

$$\text{Tensão de fase secundária: } V_{t2} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ volts.}$$

$$\text{Corrente secundária } I_2 = \frac{W_t}{V_{t2}} = \frac{20\,000}{127} = 157 \text{ A.}$$

$$\text{Tensão secundária de curto-círcuito: } V''_{ce} = \frac{127 \cdot 3}{100} = 3,81 \text{ volts.}$$

$$\text{Impedância equivalente secundária: } Z''_e = \frac{V''_{ce}}{I_2} = \frac{3,81}{157} = 0,024 \text{ ohms.}$$

$$\text{Corrente de curto-círcuito secundária: } I''_{ce} = \frac{V_2}{Z''_e} = \frac{127}{0,024} = 5300 \text{ A.}$$

A chave de proteção do transformador deve possuir contatos capazes de interromper a corrente de 5300 Ampères sem ficarem danificados.

CAPÍTULO IV

40) TRANSFORMADORES ESPECIAIS COM TRANSFORMAÇÃO DO NÚMERO DAS FASES

Transformação trihexafásica com sistema fechado

A transformação trihexafásica é muito importante para a alimentação de conversores e comutatrizes.

Se a carga for constituída por seis fases análogas, fechadas em hexágono, como nos casos das comutatrizes, pode-se usar um transformador trifásico ordinário, conforme a ligação da fig. 134.

Em substituição ao transformador trifásico podem ser usados três transformadores monofásicos.

As fases primárias podem ser ligadas em estrela ou triângulo.

As fases secundárias são ligadas às fases utilizadoras, de forma que os bornes de cada fase secundária sejam ligados a vértices diametralmente opostos.

A tensão v que atua sobre cada fase utilizadora é igual à metade da tensão de cada fase secundária do transformador.

Quando é necessário realizar o agrupamento aberto como no caso de transformadores que alimentam retificadores de vapor de mercúrio, a ligação usada é a de dupla estrela, conforme fig. 135.

Cada coluna deve possuir duas fases secundárias iguais e distintas, com as quais se realizam duas estrelas distintas. A união dos centros das duas estrelas forma o neutro do sistema.

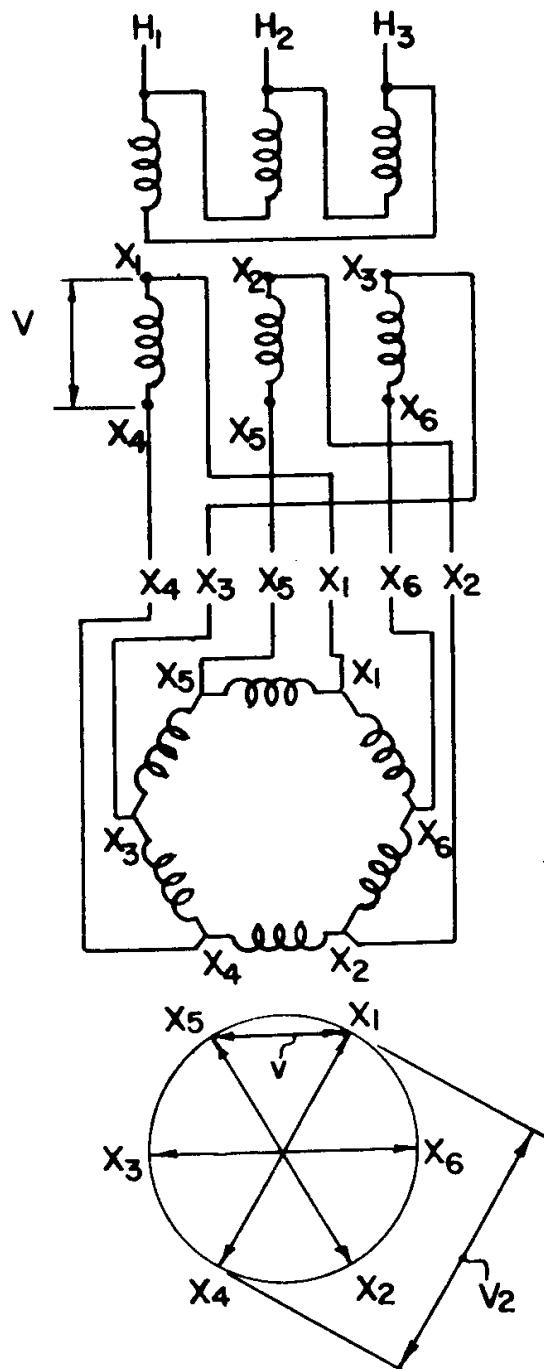
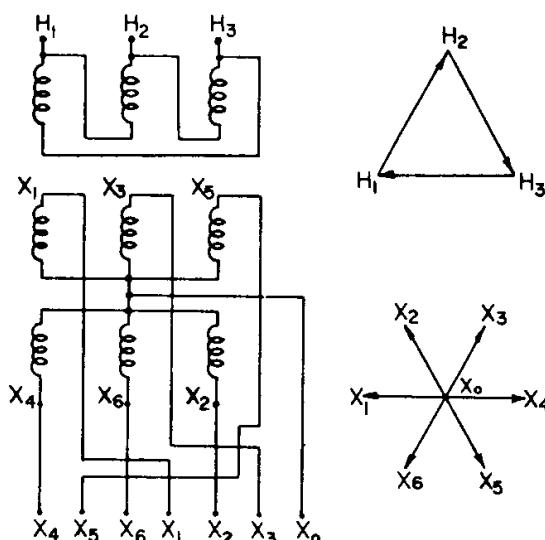


Fig. 134



Este tipo de ligação secundária requer que as fases primárias sejam ligadas em triângulo, a fim de melhor se repartir a carga entre as fases da linha de alimentação.

A fim de melhorar a divisão da carga na linha primária, especialmente quando se trata da alimentação de retificadores hexafásicos, empregam-se agrupamento zigue-zague, conforme indica a fig. 136.

As tensões estreladas do sistema são representadas por x_0x_1 ; x_0x_2 ; x_0x_3 ; x_0x_4 ; x_0x_5 ; x_0x_6 . Cada uma destas tensões é obtida com a participação de duas colunas, de forma que a carga de cada fase secundária interessa duas fases primárias, por esta razão as fases primárias podem ser, indiferentemente, ligadas em estrela ou triângulo.

Praticamente os três enrolamentos secundários de cada coluna são concêntricos e as respectivas ligações são feitas conforme indica a fig. 136 (c).

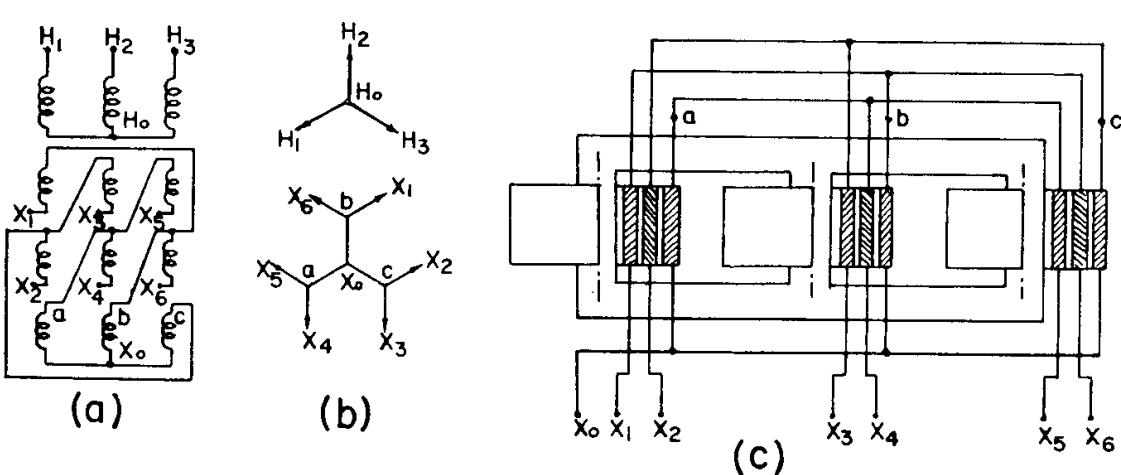


Fig. 136

41) TRANSFORMADOR COM CORRENTE CONSTANTE

Com o nome de transformador de corrente constante define-se um transformador especial que realiza a transformação de uma linha primária, com tensão constante, para uma linha secundária com corrente constante, independentemente da resistência do circuito utilizador.

O mais comum destes transformadores é constituído segundo a disposição esquemática indicada na fig. 137. Compõe-se de um núcleo envolvente, com colunas compridas sobre o qual estão colocados os dois enro-

lamentos, primário e secundário, representados por duas bobinas. A bobina primária apóia-se no fundo e a bobina secundária, pelo contrário, está livremente suspensa a um balanço provido de um oportuno contrapeso. Este contrapeso sozinho não é suficiente para equilibrar o peso da bobina móvel. O equilíbrio perfeito realiza-se quando o transformador está funcionando, pela intervenção da repulsão eletrodinâmica que se produz entre as duas bobinas. As duas bobinas são percorridas por duas correntes opostas e, portanto, se repelem mutuamente.

O funcionamento do transformador verifica-se então da maneira exposta a seguir.

Quando o secundário está aberto, sobre a bobina móvel não age nenhuma ação repulsiva e, portanto, a bobina secundária apóia-se livremente sobre a bobina primária. Nestas condições, nos bornes da bobina secundária existe uma diferença de potencial igual à f.e.m. E_2^0 que se gera em virtude do fluxo produzido pela corrente magnetizante que circula na bobina primária. Se o circuito primário for alimentado pela tensão V_1 , resulta

$$E_2^0 = \frac{V_1 \cdot N_2}{N_1}$$

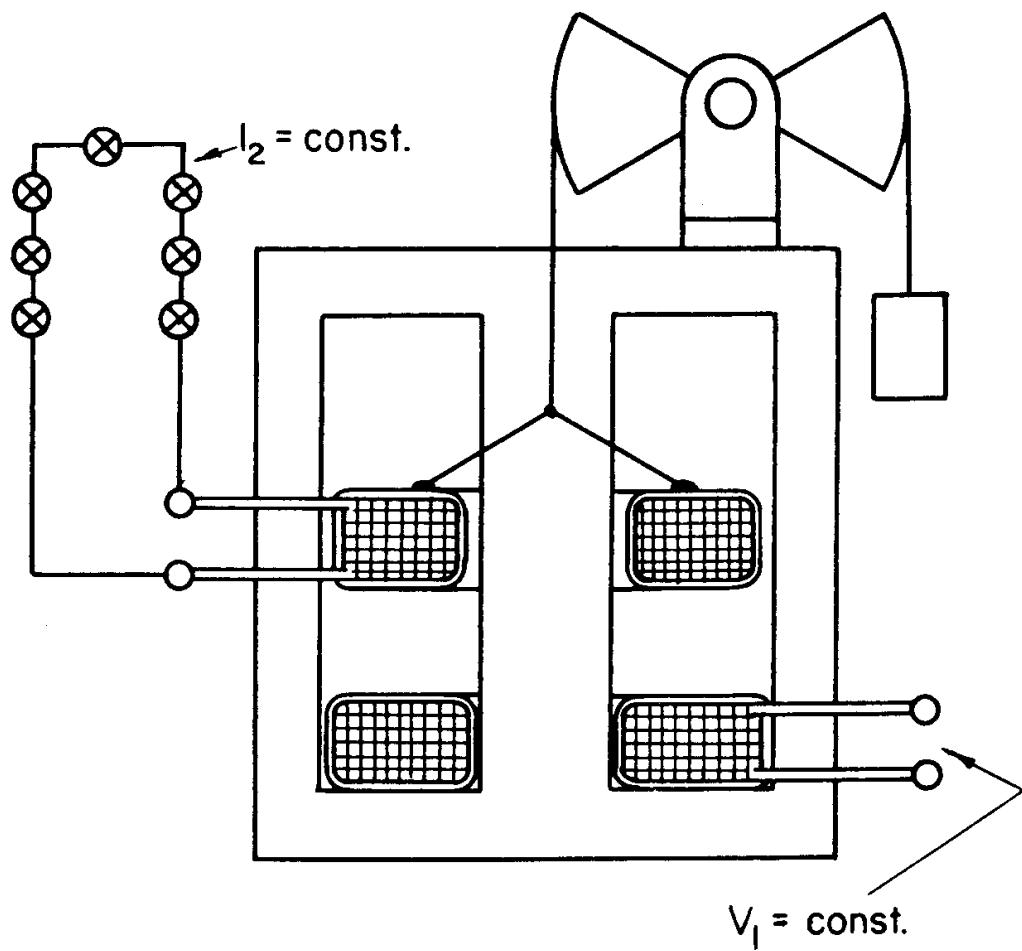


Fig. 137

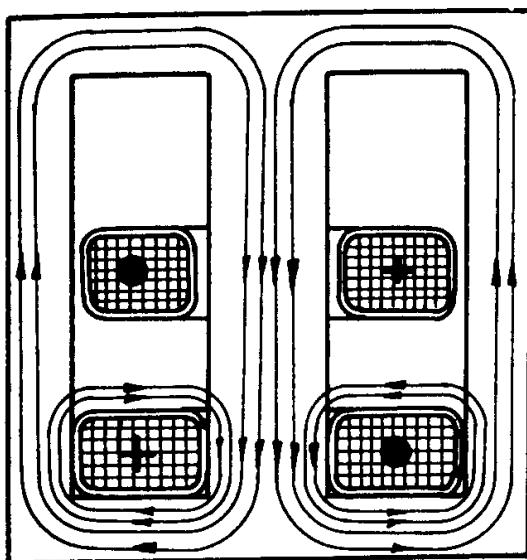


Fig. 138

Fechando-se os bornes da bobina secundária em curto-círcuito, as duas bobinas tenderão, num primeiro momento, a ser percorridas por duas correntes muito intensas. No mesmo instante em que as duas correntes se produzem pela repulsão eletrodinâmica que se verifica, a bobina secundária levanta-se ajudada pelo contrapeso até determinada posição de equilíbrio. No amplo intervalo que se forma entre as duas bobinas se produz então uma grande dispersão magnética determinada pelo contraste entre os dois fluxos produzidos separadamente pelas duas bobinas percorridas por duas correntes opostas.

O campo de dispersão adquire aproximadamente a forma indicada na fig. 138. O fluxo disperso é tanto maior quanto maior for a distância entre as duas bobinas.

Os efeitos das dispersões magnéticas ao redor dos enrolamentos são análogos aos efeitos causados por uma reatância inserida ao circuito secundário, à qual se dá o nome de reatância equivalente secundária. Sendo o valor desta reatância muito elevado, o valor da corrente de curto-círcuito do transformador resulta pequeno.

Inserindo no secundário uma determinada resistência: a corrente nas duas bobinas tende num primeiro tempo a diminuir; mas a esta diminuição instantânea das correntes corresponde um enfraquecimento da repulsão eletrodinâmica entre as duas bobinas. A bobina móvel abaixa-se; com o diminuir da distância entre as duas bobinas diminui a reatância de dispersão, de maneira que a impedância resultante não varia. A corrente readquire assim o valor inicial e a bobina móvel pára "nesta nova posição em que se verifica o equilíbrio entre os pesos e a repulsão eletrodinâmica.

Sendo os pesos e a repulsão constantes, as correntes resultam constantes também.

O fenômeno repete-se a cada variação da resistência de carga, de maneira que a cada aumento ou diminuição da resistência de carga corresponde uma variação em sentido oposto ao da reatância de dispersão. Esta variação é consequência do deslocamento da bobina móvel, a qual troca espontaneamente de posição a cada variação da carga. A impedância resultante fica assim constante e, portanto, fica constante também a corrente secundária, qualquer que seja o valor da resistência de carga. No limite imposto pela potência do transformador, a tensão nos bornes secundários varia correspondentemente em proporção à resistência da carga.

Com carga normal a bobina móvel tende a deslocar-se em contato com a bobina fixa. Esta posição corresponde à mínima reatância de dispersão e, portanto, à máxima tensão nos bornes.

Dos fatos expostos resulta que o transformador com corrente constante pode ser reduzido ao circuito equivalente indicado na fig. 139 (a). Neste esquema R''_e representa a resistência equivalente secundária dos dois enrolamentos e X''_e representa a reatância equivalente secundária que se verifica quando as duas bobinas estão em contato. X_2 representa, pelo contrário, a reatância adicional variável que intervém quando a bobina móvel se levanta e R_2 representa a resistência de carga.

A disposição do cursor *c* chama a atenção sobre o fato de que quando aumenta a resistência R_2 , a reatância X_2 automaticamente diminui e vice-versa.

Com base neste circuito, o diagrama vetorial do transformador adquire a forma representada na fig. 139 (b). A tensão V_1 aplicada ao enrolamento primário transforma-se na f.e.m. secundária

$$E^o_2 = \frac{N_2}{N_1}.$$

Se os bornes secundários estão fechados em curto-circuito, isto é, $R_2 = 0$, a bobina móvel resulta completamente levantada e a reatância X_2 é máxima. Nestas condições, no secundário circula uma corrente I_o definida pela relação:

$\overline{E_2^o} = \overline{R_e'' I_o} + (\overline{X_e''} + X_2) I_o$:
 esta corrente é defasada de um ângulo que é muito próximo a 90° ,
 sendo a resistência R_2'' muito pequena com respeito à reatância
 $(X_e'' + X_2)$. A corrente secundária I_o corresponde a corrente primária
 de reação

$$I'_o = I_o \frac{N_2}{N_1}.$$

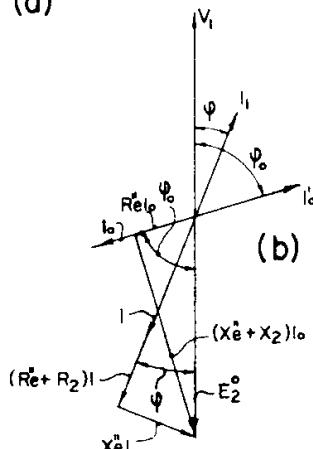
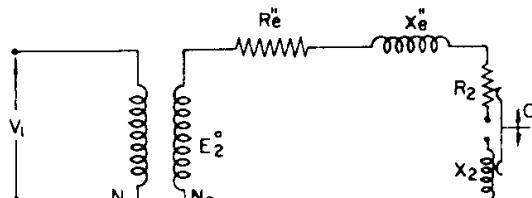


Fig. 139

Inserindo-se no secundário a máxima resistência compatível com a potência do transformador, a bobina móvel desce sobre a outra e a reatância X_2 resulta nula. Verificando-se a compensação quase exata entre o aumento de resistência e a diminuição da reatância, a impedância total fica praticamente a mesma e, portanto, o valor eficaz da corrente fica invariável. Varia porém o ângulo de defasagem do valor ϕ_o a ϕ ,

pois a corrente é representada agora pelo vetor I definido por $E_2^o = (R''_e + R_2)I + X''_e I$. A tensão nos bornes secundários adquire correspondentemente o valor $V_2 = R_2 I$, e resulta em fase com I , enquanto a corrente primária de reação é representada pelo valor I_1 diretamente oposto a I .

Para todas as condições de carga intermediárias o vetor representativo da corrente secundária desloca-se no setor compreendido entre I_o e I e analogamente a corrente primária (desprezando a corrente magnetizante) desloca-se no setor compreendido entre I'_o e I' .

Concluindo, pode-se dizer que variando a resistência da carga as correntes ficam inalteradas, variando porém o fator de potência.

O transformador considerado apresenta o inconveniente de que no funcionamento com carga reduzida (isto é, com uma resistência de carga inferior à máxima que este pode alimentar) o fator de potência sobre a linha primária alcança valores excessivamente baixos. Com plena carga, quando as bobinas estão em contato, a reatância de dispersão é sempre notável e o fator de potência fica igualmente baixo embora o circuito utilizador seja puramente ôhmico.

Praticamente, o fator de potência a vazio pode resultar da ordem de 0,15, enquanto o fator de potência a plena carga pode alcançar ao máximo um valor de 0,9.

O transformador do tipo descrito encontra a sua mais importante aplicação na alimentação das instalações de iluminação pública com corrente constante, com lâmpadas em série.

Para esta aplicação, os transformadores com corrente constante são construídos em geral para potências pequenas, quase sempre inferiores a 30 kVA, e por um valor constante da corrente secundária de 6,6 ou 7,9 A, os quais constituem os dois valores mais comuns da corrente de funcionamento das lâmpadas em série. A tensão primária é compreendida em geral entre 6000 e 20 000 volts.

Outro campo de aplicação dos transformadores com corrente constante é representado por alguns tipos de fornos elétricos e transformadores para solda elétrica. Nestes casos em que a corrente secundária é muito intensa e torna difícil a obtenção de cabos flexíveis, os quais devem permitir o livre movimento da bobina, se mantém fixa a bobina secundária, deixando-se mover a primária.

Em todos os casos a bobina móvel é provida de oportunos amortecedores, a fim de que a passagem de uma posição a outra se verifique sem oscilações que produziriam flutuações de corrente.

CAPÍTULO V

42) AUTOTRANSFORMADORES

a) Monofásicos

Os autotransformadores possuem estrutura magnética idêntica à dos transformadores normais, mas diferem destes na parte elétrica: os dois enrolamentos A.T. e B.T. não formam dois complexos de espiras distintas, mas são pelo contrário agrupados num único enrolamento.

Nestas condições o enrolamento B.T. é constituído por uma parte das espiras que forma o enrolamento A.T. O esquema elétrico do autotransformador adquire a forma representada na fig. 140 (a). No funcionamento a vazio, alimentando o enrolamento através dos bornes A e B com tensão V_1 , este absorve a corrente a vazio I_o necessária para produzir o fluxo Φ , que por sua vez gera no enrolamento mesmo uma f.e.m.. E_1 que equilibra a tensão aplicada. Correspondentemente, entre os bornes secundários a e b resulta disponível uma f.e.m.

$$E_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1}$$

Passando ao funcionamento com carga, quando o enrolamento secundário fornece uma corrente I_2 , o enrolamento primário, além da corrente a vazio absorve a corrente de reação I'_1 definida em valor pela conhecida igualdade $N_2 I_2 = N_1 I'_1$.

No grupo de espiras compreendidas entre os dois bornes secundários, que são comuns também ao enrolamento primário, as duas correntes I_2 e I'_1 sobrepõem-se, pois possuem sentido contrário, formando uma corrente igual em valor à diferença aritmética das mesmas. No autotransformador com carga, as correntes adquirem assim a distribuição indicada na fig. 140 (b).

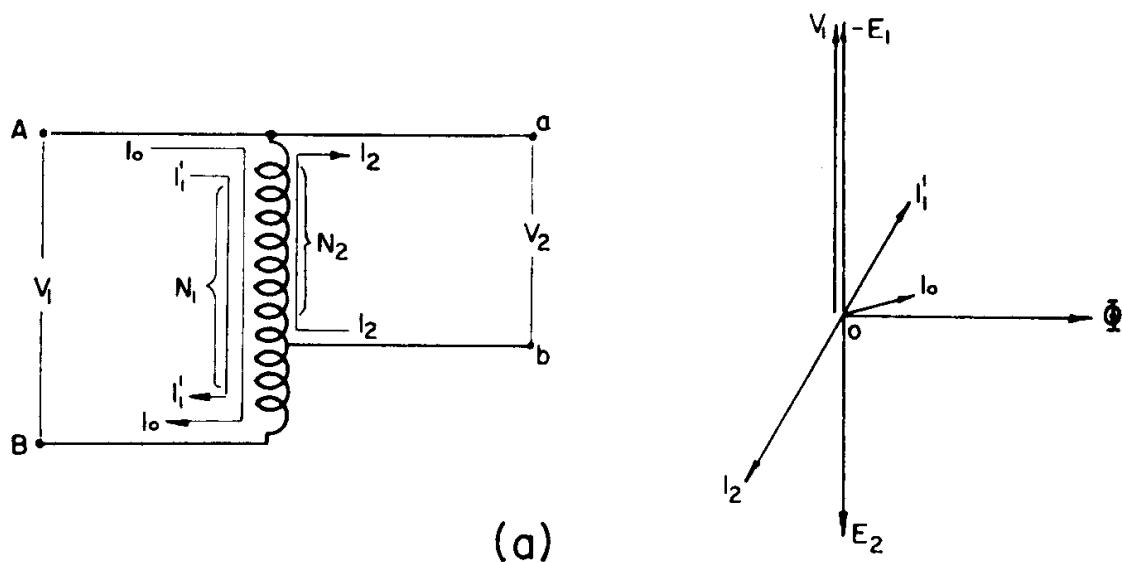
É fácil ver que se realiza uma dupla economia de cobre. Fazendo de fato a comparação com um transformador normal, observa-se em primeiro lugar que das N_1 espiras necessárias ao enrolamento A.T., N_2 espiras são economizadas, pois estas são substituídas pelas N_2 espiras necessárias ao enrolamento B.T. Em segundo lugar, enquanto no transformador normal a seção dos condutores do enrolamento B.T. deve ser proporcionada à inteira corrente I_2 , no autotransformador as N_2 espiras do enrolamento B.T. (desprezando-se a corrente a vazio I_o) devem ser proporcionadas somente à diferença das correntes ($I_2 - I'_1$).

Admitindo que o peso do cobre necessário para executar um enrolamento seja proporcional ao produto das espiras pela corrente, a relação

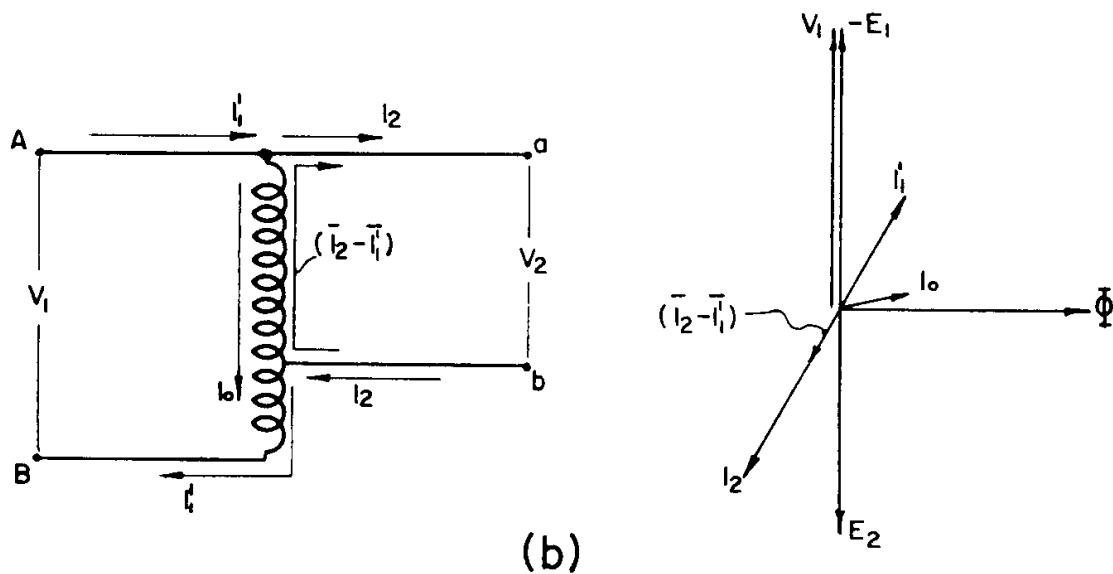
entre o peso P_a dos enrolamentos de um autotransformador e o peso análogo P_n do correspondente transformador normal é expresso por:

$$\frac{P_a}{P_n} = \frac{(N_1 - N_2) I_1 + N_2 (I_2 - I_1)}{N_1 I_1 + N_2 I_2}$$

Pondo $I_1 = I_1' = \frac{N_2}{N_1} I_2$ resulta



(a)



(b)

Fig. 140

$$\frac{P_a}{P_n} = \frac{\left(N_1 - N_2 \right) \frac{N_2}{N_1} I_2 + N_2 \left(I_2 - \frac{N_2}{N_1} I_2 \right)}{N_1 \frac{N_2}{N_1} I_2 + N_2 \cdot I_2}$$

dividindo por $N_2 I_2$

obtém-se

$$\frac{P_a}{P_n} = \frac{\frac{N_1 - N_2}{N_1} + 1 - \frac{N_2}{N_1}}{1 + 1} = \frac{\frac{N_1 - N_2 + N_1 - N_2}{N_1}}{2} = \frac{2N_1 - 2N_2}{N_1} = \frac{N_1 - N_2}{N_1}$$

e portanto também $\frac{P_a}{P_n} = \sim \frac{V_1 - V_2}{V_1}$

Vê-se com isto que a economia de cobre é tanto maior quanto menor é a diferença ($V_1 - V_2$); por exemplo, para uma transformação de 250 a 200 volts, o autotransformador emprega um peso de cobre de apenas $1/5$ do peso necessário a um transformador normal de igual potência.

Além disso o autotransformador apresenta menor queda de tensão e maior rendimento em virtude da parcial compensação das correntes no enrolamento B.T.

A vantagem do autotransformador diminui e fica quase desprezível quando a relação de transformação aumenta além de certo limite.

Praticamente se abandona o emprego do autotransformador quando a relação entre a alta e a baixa tensão é maior que 3.

Este critério é também sugerido pelo fato de que no autotransformador, tendo-se os dois enrolamentos em comunicação elétrica entre si, a isolacão com respeito à massa deve ser a mesma tanto pelo enrolamento A.T. quanto ao B.T.

Este fato perde a importância somente se é lícito conectar à terra o borne comum aos dois circuitos A.T. e B.T. como indica a fig. 141.

O autotransformador é reversível, isto é, pode funcionar tanto como redutor quanto como elevador de tensão.

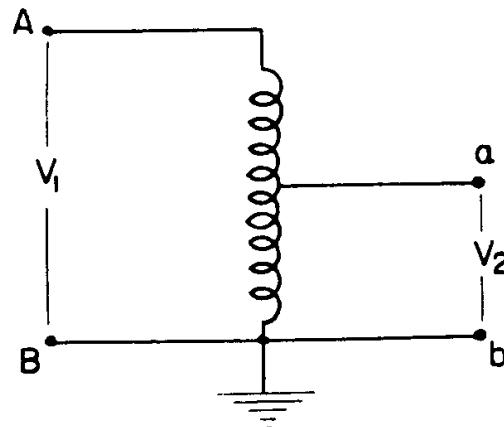


Fig. 141

b) *Trifásicos*

O autotransformador trifásico pode ser realizado com o agrupamento das fases em estrela, como indica a fig. 142 (a) ou também com as fases agrupadas em triângulo como na fig. 142 (b).

Nos dois casos os diagramas vetoriais da transformação adquirem a forma indicada na fig. 142 (a') e 142 (b'). O agrupamento em triângulo quase nunca é empregado nos autotransformadores, pois resulta muito menos econômico que o agrupamento em estrela.

Além disso este último permite realizar qualquer relação de transformação, enquanto o agrupamento em triângulo, excluído o caso de emprego de artifícios especiais, permite somente, como é fácil deduzir do diagrama (b'), relações de transformação compreendidas entre 1:1 e 1:2. O agrupamento em estrela oferece também a possibilidade da ligação do centro à terra a fim de eliminar o perigo de sobretensões com respeito à terra na linha B.T.

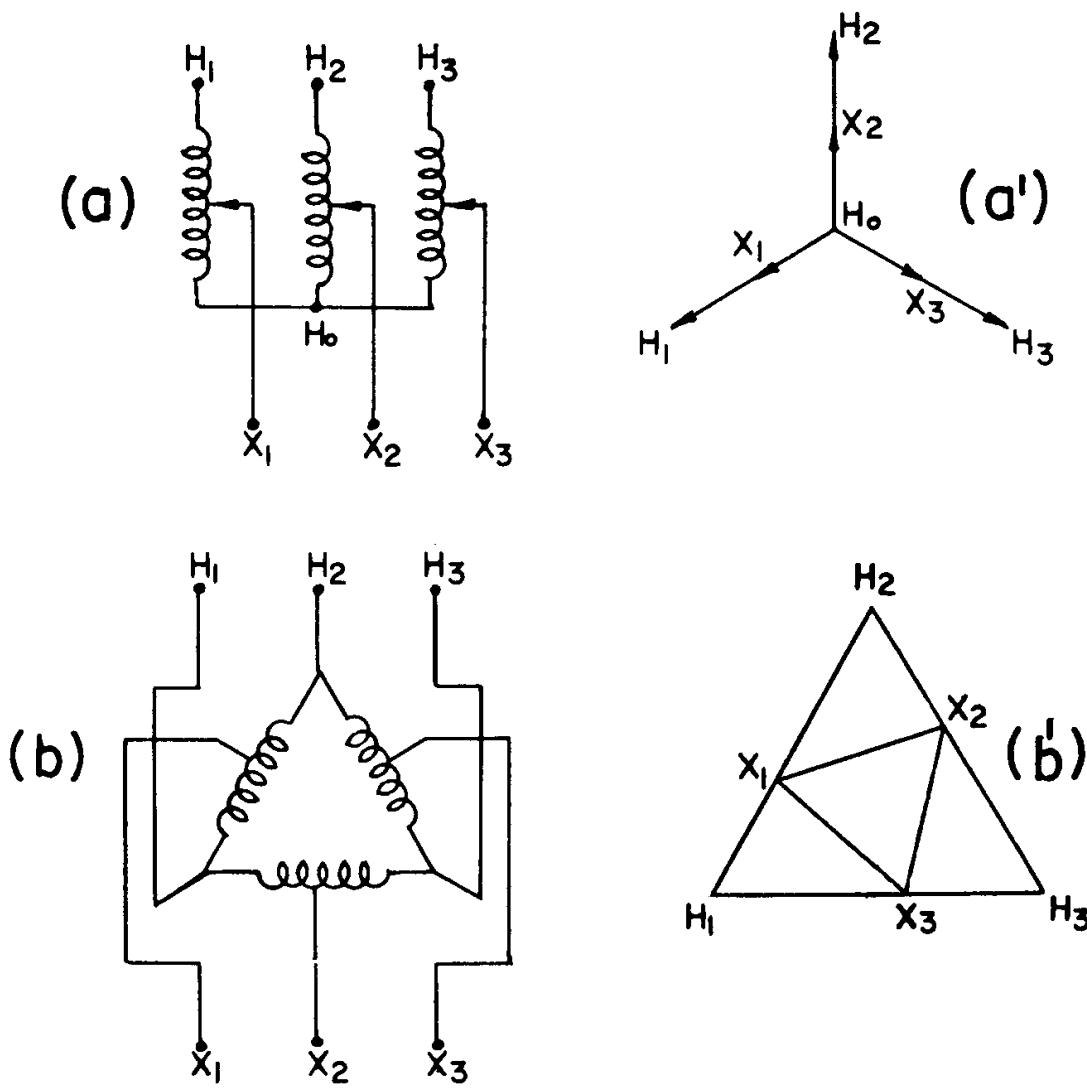


Fig. 142

Nos autotransformadores em estrela, o deslocamento angular entre A.T. e B.T. é sempre nulo. Nos autotransformadores em triângulo, este deslocamento angular varia ao variar a relação de transformação.

c) *Divisor de Tensão*

Um tipo especial de autotransformador é representado pelo aparelho conhecido com o nome de divisor de tensão. Este é constituído por um único enrolamento com um determinado número de bornes intermediários, conforme fig. 143.

Se os vários circuitos secundários forem igualmente carregados, o enrolamento é percorrido somente pela corrente magnetizante I_0 . Os aparelhos utilizadores inseridos conforme indica a fig. 143 funcionam, neste caso, como se estivessem simplesmente ligados em série entre si.

Os fios externos são percorridos por corrente, enquanto os intermediários são inativos.

Os fios intermediários atuam, para manter a exatidão das tensões, quando os vários circuitos secundários são diferentemente carregados. Neste caso cada fio intermediário conduz a corrente igual à diferença entre as correntes de carga de dois circuitos adjacentes, dos quais este representa o fio comum.

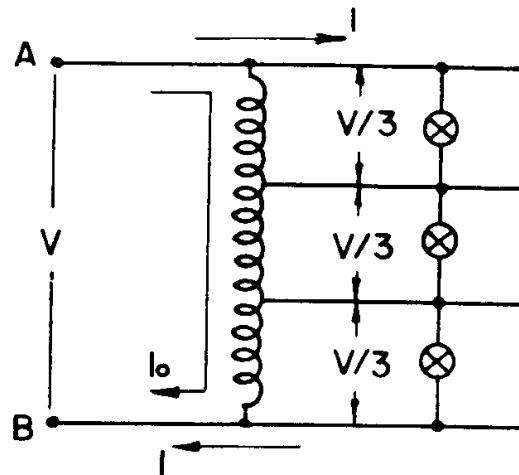


Fig. 143

43) CONSIDERAÇÕES E DADOS PARA O PROJETO DOS AUTOTRANSFORMADORES DE PEQUENA POTÊNCIA MONOFÁSICOS

a) *Potência transformada*

Foi visto no parágrafo anterior que o peso do cobre de um autotransformador é menor que o de um transformador da mesma potência, existindo entre os dois a seguinte relação:

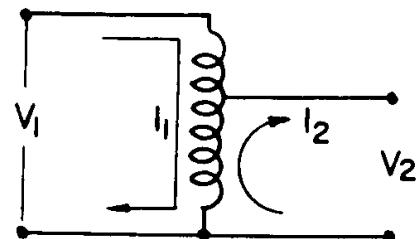


Fig. 144

$$\frac{P_a}{P_n} = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

Esta fórmula é relativa a um autotransformador redutor, onde $V_1 > V_2$, conforme fig. 144. Multiplicando o numerador e o denominador da fração do segundo membro da equação antes escrita pelo valor da corrente I_1 , obtém-se

$$\frac{W_a}{W_n} = \frac{I_1(V_1 - V_2)}{I_1 V_1}$$

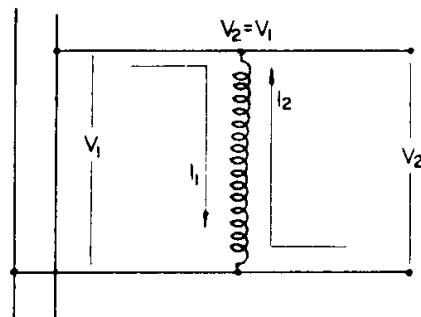


Fig. 145

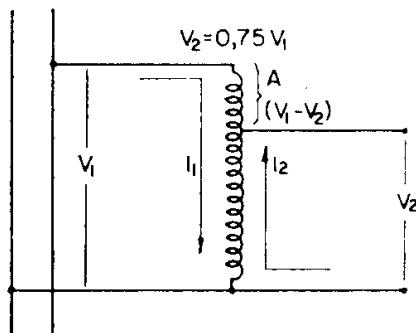


Fig. 146

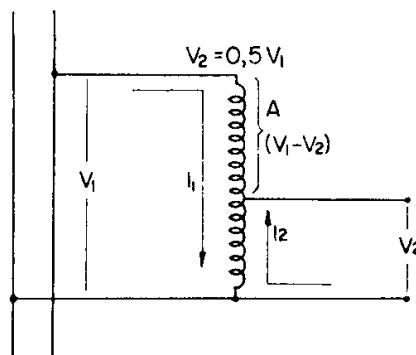


Fig. 147

transformação e a contribuição do aparelho não efetua nenhuma transformação, isto é,

$$W_a = (V_1 - V_2) I_1 = 0.$$

Por outro lado, sendo $I_2 = I_1$, além da corrente magnetizante nenhuma corrente atravessa o enrolamento. Nestas condições, sejam quais forem os valores de V_1 ; V_2 ; I_1 e I_2 o aparelho não transforma nenhuma potência.

No caso da fig. 146 onde V_2 é menor que V_1 , processa-se uma transformação e a contribuição do aparelho será tanto maior quanto maior for a diferença $V_1 - V_2$. A diferença $V_1 - V_2$ é justamente a diferença de potencial que atua sobre o grupo das espiras A. Estas espiras são atravessadas pela corrente I_1 , assim sendo, a contribuição do aparelho na transformação, ou seja, a potência transformada é $W_t = W_a = I_1 (V_1 - V_2)$.

O denominador da fração $I_1 V_1$ representa a potência nominal do transformador, cujo peso de cobre é P_n .

O produto $I_1 (V_1 - V_2)$, relativo ao autotransformador, também é uma potência, que é chamada potência transformada. Esta potência representa a contribuição do autotransformador na transformação.

Em se tratando de autotransformador elevador a fórmula da potência transformada adquire a seguinte expressão: $I_2 (V_2 - V_1)$.

A potência transformada num autotransformador tem grande importância, pois o projeto dos mesmos baseia-se sobre esta potência e não sobre a nominal. A fim de melhor esclarecer o conceito, examina-se o caso da fig. 145 em que o aparelho não efetua nenhuma transformação, isto é,

No caso da fig. 147 valem os mesmos conceitos já expostos para o aparelho da fig. 146. Deve-se salientar, porém, que, sendo a diferença $V_1 - V_2$ maior que no caso anterior, o aparelho da fig. 147 transforma maior potência que o da fig. 146.

Tanto o aparelho da fig. 146 como o da fig. 147 são autotransformadores redutores e para ambos é válida a fórmula:

$$W_t = I_1(V_1 - V_2)$$

Para o autotransformador elevador valem os mesmos conceitos expostos para o redutor. A contribuição do aparelho na transformação processa-se nas espiras A, conforme fig. 148, nos bornes dos quais existe a diferença de potencial $(V_2 - V_1)$.

Sendo as espiras A atravessadas pela corrente I_2 , nos autotransformadores elevadores a potência transformada é fornecida por:

$$W_t = I_2(V_2 - V_1)$$

A fim de melhor esclarecer a diferença entre o conceito de potência nominal e de potência transformada, examina-se o autotransformador da fig. 149, que tem potência nominal de 500 VA, tensão primária 120 volts e tensão secundária 110 volts.

Por comodidade consideram-se nulas as perdas, resultando

$$\begin{aligned} W_{a1} &= V_1 \cdot I_1 = 500 \text{ VA} \text{ e } W_{a2} = \\ &= V_2 \cdot I_2 = 500 \text{ VA} \end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{W_{a1}}{V_1} = \frac{500}{120} = 4,16 \text{ Amperes}$$

$$I_2 = \frac{W_{a2}}{V_2} = \frac{500}{110} = 4,55 \text{ Amperes}$$

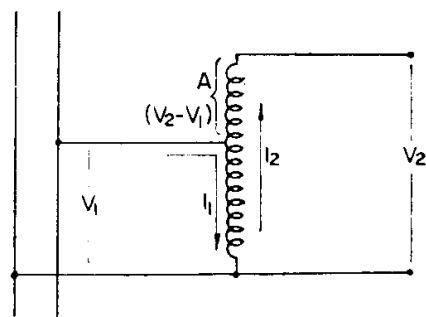


Fig. 148

O condutor das espiras A deve ser proporcional à corrente $I_1 = 4,16 \text{ A}$, enquanto o das espiras B deve ser proporcional à corrente $I_a = I_2 - I_1 = 4,55 - 4,16 = 0,39 \text{ Amperes}$.

A potência transformada é

$$W_t = I_1 (V_1 - V_2) = 4,16 (120 - 110) = 41,6 \text{ VA}$$

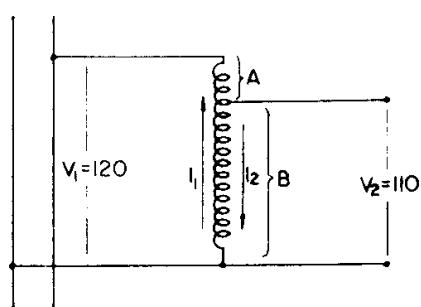


Fig. 149

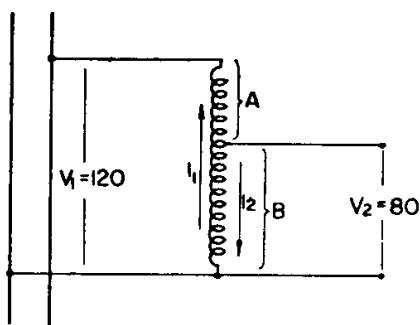


Fig. 150

Examine-se agora o autotransformador da fig. 150, que possui também a potência nominal de 500 VA e a tensão primária $V_1 = 120$ volts. Sua tensão secundária porém é $V_2 = 80$ volts.

Neste caso resulta:

$$I_1 = \frac{W_{a1}}{V_1} = \frac{500}{120} = 4,16 \text{ Ampères}$$

$$I_2 = \frac{W_{a2}}{V_2} = \frac{500}{80} = 6,25 \text{ Ampères}$$

O condutor das espiras A deve ser proporcional à corrente $I_1 = 4,16 \text{ A}$, enquanto o das espiras B deve ser proporcional à corrente

$$I_a = I_2 - I_1 = 6,25 - 4,16 = 2,09 \text{ A.}$$

A potência transformada resulta:

$$W_t = I_1 (V_1 - V_2) = 4,16 (120 - 80) = 166,4 \text{ VA}$$

Confrontando o autotransformador da fig. 149 e o da fig. 150 chega-se à conclusão de que, embora os dois possuam a mesma potência nominal, o da fig. 150 transforma mais potência que o da fig. 149.

A diferença entre os dois aparelhos é mais visível no quadro comparativo da fig. 151.

Uma vez calculada a potência transformada, o projeto do aparelho é feito com o esquema de cálculo exposto a seguir.

	Autotransformador Fig. 149	Autotransformador Fig. 150
Potência nominal	500 VA	500 VA
Potência transformada	41,6 VA	166,4 VA
Corrente nas espiras A	4,16 A	4,16 A
Corrente nas espiras B	0,39 A	2,09 A
$V_1 - V_2$	10 V	40 V

Fig. 151

b) *Esquema de Cálculo dos Autotransformadores monofásicos*

A seção magnética do núcleo é calculada com base na potência transformada W_t , através da fórmula:

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_t}{f}}$$

A escolha do núcleo e das espiras por volt é feita com as mesmas fórmulas dos transformadores, pois as lâminas serão solicitadas também com a indução $B_M = 11\,300$ gauss. A densidade de corrente nos condutores é escolhida nos mesmos limites que nos transformadores, lembrando-se, porém, que nos autotransformadores sua escolha deve ser orientada pela potência transformada.

Todas as demais grandezas, como sejam, perdas no ferro, no cobre, rendimento e possibilidade de execução, obedecem às fórmulas empregadas no projeto dos transformadores.

Nos autotransformadores a compensação das quedas de tensão é feita aumentando-se de 5% as espiras secundárias.

44) EXEMPLOS DE CÁLCULO DOS AUTOTRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

EXEMPLO N.^o 1

Autotransformador monofásico:

$f = 50$ Hz; $W_2 = 300$ VA; $V_1 = 120$ V e $V_2 = 220$ V.

Potência primária $W_1 = 1,1 \cdot W = 1,1 \cdot 300 = 330$ VA

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{300}{220} = 1,36 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{W_1}{V_1} = \frac{330}{120} = 2,75 \text{ A}$$

Nas espiras (A), fig. 152, passa a corrente I_2 , por isso a seção destas espiras é:

$$S_a = \frac{I_2}{d} = \frac{1,36}{3} = 0,45 \text{ mm}^2$$

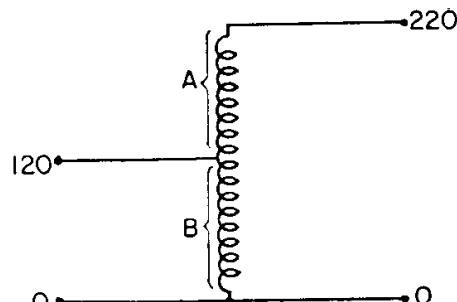


Fig. 152

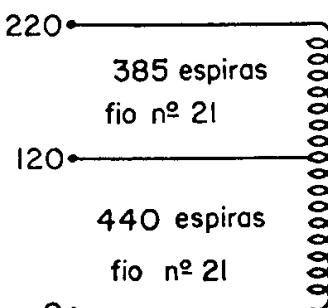


Fig. 153

Usa-se fio n.^o 21 (AWG) cuja seção é 0,41 mm². Nas espiras B passa a corrente $I_a = I_1 - I_2 = 2,75 - 1,36 = 1,39$ A.

$$\text{Sua seção resulta: } S_a = \frac{I_a}{d} = \frac{1,39}{3} = 0,46 \text{ mm}^2$$

Usa-se fio n.^o 21 (AWG) cuja seção é 0,41 mm².

Potência transformada = $I_2(V_2 - V_1) = 1,36(220 - 120) = 136$ VA

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_t}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{136}{50}} = 7,5 \sqrt{2,72} = 7,5 \cdot 1,65 = 12,4 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 12,4 = 13,6 \text{ cm}^2$$

Usa-se lâmina padronizada n.^o 5; Seção do núcleo: $a = 4$; $b = 3$

$$S_g = 4 \cdot 3 = 12 \text{ cm}^2; S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{12}{1,1} = 10,9 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{10,9} = 3,67$$

Para o circuito primário entre 0 e 120;

$$N_B = 3,67 \cdot 120 = 440 \text{ esp.}$$

Para o circuito secundário entre 120 e 220; $N_A = 3,67 \cdot 100 \cdot 1,05 = 385$

$$S_{eu} = N_B \cdot S_a + N_A \cdot S_2 = 440 \cdot 0,41 + 385 \cdot 0,41 = 338 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{eu}} = \frac{1200}{338} = 3,55. \text{ Execução possível.}$$

Peso do ferro $P_{fe} = 0,674 \cdot 3 = 2,022$ kg

$$1m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 4 + 2 \cdot 3 + 0,5 \cdot 4 \cdot 3,14 = 20,28 \text{ cm}$$

$$P_{eu} = \frac{S_{eu}}{100} \cdot I_m \cdot 9 = \frac{338}{100} \cdot 20,28 \cdot 9 = 617 \text{ g}$$

EXEMPLO N.^o 2

Autotransformador monofásico: $f = 50$ Hz; $W_t = 500$ VA; $V_1 = 115$ V; $V_2 = 230$ V. Ordenando-se o cálculo como nos transformadores obtém-se:

$$W_2 = 500; V_2 = 230; I_2 = \frac{500}{230} = 2,17 \quad S_2 = \frac{2,17}{3} = 0,725$$

usa-se fio 18 ($0,82 \text{ mm}^2$)

$$W_1 = 550; V_1 = 115; I_1 = \frac{550}{115} = 4,8; I_a = 4,8 - 2,17 = 2,63; S_a = \frac{2,63}{3} = 0,88$$

usa-se fio 18 ($0,82 \text{ mm}^2$)

Potência transformada = $I_2(V_2 - V_1) = 2,17 (230 - 115) = 2,17 \cdot 115 = 250 \text{ VA}$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_t}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{250}{50}} = 7,5 \sqrt{5} = 7,5 \cdot 2,24 = 16,8 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 16,8 = 18,5;$$

Seção do núcleo: $a = 4; b = 5$

$$S_g = 4 \cdot 5 = 20 \text{ cm}^2; S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{20}{1,1} = 18,2 \text{ cm}^2;$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{18,2} = 2,2$$

$$0 - 115) N_B = 2,2 \cdot 115 = 253 \text{ esp.}$$

$$115 - 230) N_A = 2,2 \cdot 115 \cdot 1,05 = 265 \text{ esp.}$$

$$S_{eu} = (253 + 265) 0,82 = 425 \text{ mm}^2$$

$$S_j = \frac{1200}{425} = 2,82. \text{ Execução impossível.}$$

Executa-se o cálculo considerando-se a seção do núcleo $a = 4; b = 6$

$$S_g = 4 \cdot 6 = 24 \text{ cm}^2; S_m = \frac{24}{1,1} = 21,8 \text{ cm}^2 \quad \left| \text{Esp/volt} = \frac{40}{21,8} = 1,84 \right.$$

$$0 - 115) N_B = 1,84 \cdot 115 = 212 \text{ esp.}$$

$$115 - 230) N_A = 1,84 \cdot 115 \cdot 1,05 = 222 \text{ esp.}$$

$$S_{eu} = (212 + 222) 0,82 = 356 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_j}{S_{eu}} = \frac{1200}{356} = 3,38.$$

Execução possível.

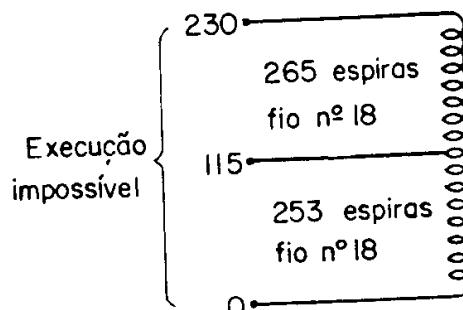
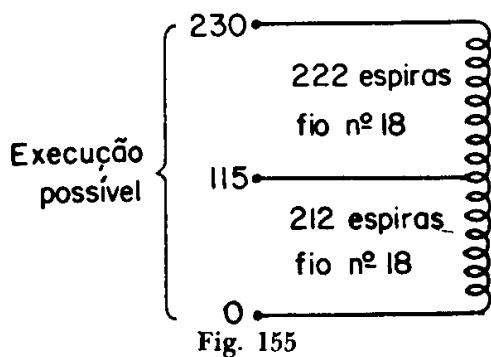


Fig. 154



$$\begin{aligned} \text{Peso do ferro } P_{fe} &= 0,674 \cdot 6 = \\ &= 4,044 \text{ kg} \\ l_m &= 2a + 2b + 0,5a\pi = 2,4 + \\ &+ 2,6 + 0,5 \cdot 4 \cdot 3,14 = 26,28 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{cu} &= \frac{S_{cu}}{100} \cdot l_m \cdot 9 = \frac{356}{100} \cdot 26,28 \cdot 9 = \\ &= 842 \text{ g.} \end{aligned}$$

EXEMPLO N.^o 3

Autotransformador monofásico: $f = 50 \text{ Hz}$; $W_2 = 1000 \text{ VA}$; $V_1 = 380 \text{ V}$; $V_2 = 110 \text{ V}$

$$W_2 = 1000; V_2 = 110; I_2 = \frac{1000}{110} = 9,1; I_a = 9,1 - 2,89 = 6,21; S_a = \frac{6,21}{2,5} = 2,5$$

fio 13 (2,62 mm²)

$$W_1 = 1100; V_1 = 380; I_1 = \frac{1100}{380} = 2,89$$

$S_1 = \frac{2,89}{2,5} = 1,15$
fio 16 (1,31 mm²)

$$\begin{aligned} \text{Potência transformada} &= I_1 (V_1 - V_2) = 2,89 (380 - 110) = \\ &= 2,89 \cdot 270 = 780 \text{ VA} \end{aligned}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_t}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{780}{50}} = 7,5 \sqrt{15,56} = 7,5 \cdot 3,93 = 29,5$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 29,5 = 32,45; \text{ Seção do núcleo } a = 6; b = 6.$$

Serão usadas lâminas não padronizadas.

$$S_g = 6 \cdot 6 = 36 \text{ cm}^2; S_m = \frac{36}{1,1} = \frac{36}{1,1} = 32,8;$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{32,8} = 1,22$$

Sendo o autotransformador redutor, a tensão primária é aplicada entre os bornes 0 e 380. Calculam-se, então, em primeiro lugar as espiras totais.

$$\begin{aligned} 0 - 380) 1,22 \cdot 380 &= 464 \text{ esp.} \\ 0 - 110) 1,22 \cdot 110 \cdot 1,05 &= 141 \text{ esp.} \\ \hline 110 - 380) &= 323 \text{ esp.} \end{aligned}$$

As espiras entre os bornes 110 e 380 são obtidas por diferença entre as espiras totais e as espiras existentes entre os bornes 0-110.

$$S_{eu} = 323 \cdot 1,31 + 141 \cdot 2,62 = 423 + 370 = 793 \text{ mm}^2$$

$$S_j = S_{eu} \cdot 3,2 = 793 \cdot 3,2 = 2538 \text{ mm}^2$$

Fixando-se a largura da janela $L_j = 3 \text{ cm} = 30 \text{ mm}$ a altura da janela resulta:

$$H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{2538}{30} = 84,6 \text{ mm} = 8,5 \text{ cm.}$$

Executa-se a janela com altura $H_j = 9 \text{ cm}$, conforme fig. 157.

$$P_{te} = [15 \cdot 18 - 2 \cdot 3 \cdot 9] 0,9 \cdot 6 \cdot 7,8 = 9098 \text{ g} = \sim 9,1 \text{ kg}$$

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 12 + 12 + 9,42 = 33,42 \text{ cm.}$$

$$P_{eu} = \frac{S_{eu}}{100} \cdot l_m \cdot 9 = \frac{793}{100} \cdot 33,42 \cdot 9 = 2395 \text{ g} = 2,395 \text{ kg.}$$

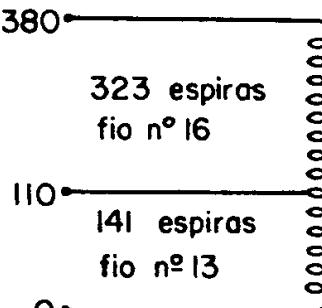


Fig. 156

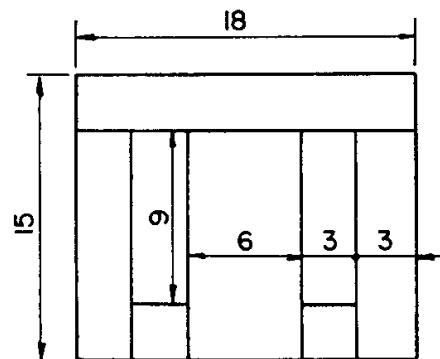


Fig. 157

45) CONSIDERAÇÕES E DADOS PARA O PROJETO DOS AUTO-TRANSFORMADORES DE PEQUENA POTÊNCIA TRIFÁSICOS

Os autotransformadores trifásicos são compostos por três autotransformadores monofásicos montados sobre o mesmo núcleo e agrupados em estrela.

A fim de se evitarem erros de ligação, as três bobinas iguais terão as saídas homônimas com fio da mesma cor, conforme indica a fig. 158.

A potência de cada autotransformador monofásico é um terço da potência total, isto é,

$$W_{t2} = \frac{W}{3}$$

A tensão primária e secundária de cada autotransformador monofásico é obtida dividindo-se a tensão de linha primária e secundária por $\sqrt{\frac{3}{3}}$

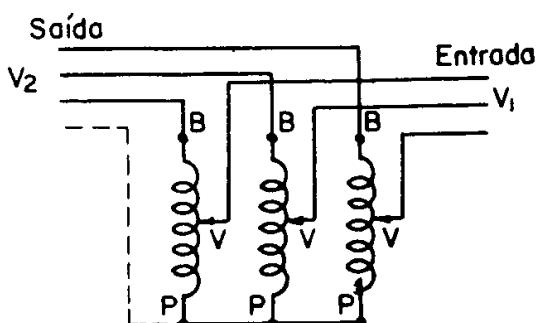


Fig. 158

$$V_{t1} = \frac{V_1}{\sqrt{3}}; V_{t2} = \frac{V_2}{\sqrt{3}}$$

O núcleo usado para os autotransformadores trifásicos é análogo ao dos transformadores trifásicos. Em geral a largura da janela deste núcleo é igual à largura das colunas, isto é, $L_j = a$.

Para o cálculo da seção do núcleo, da área das janelas, do peso do cobre e do ferro usam-se as mesmas fórmulas dos transformadores trifásicos.

O cálculo das espiras e da seção dos fios é feito com as fórmulas usadas para os autotransformadores monofásicos.

Os exemplos que seguem esclarecerão melhor os conceitos expostos.

46) EXEMPLOS DE CÁLCULO DOS AUTOTRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

EXEMPLO N.^o 1

Autotransformador trifásico: $f = 50$ Hz; $W_{a2} = 3000$ VA; $V_1 = 220$ V; $V_2 = 380/220$ V.

$$W_2 = \frac{3000}{3} = 1000; \quad V_{t2} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220; \quad I_2 = \frac{1000}{220} = 4,55 \text{ A.}$$

$$W_1 = 1000 \cdot 1,1 = 1100; \quad V_{t1} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127; \quad I_1 = \frac{1100}{127} = 8,66;$$

$$I_a = 8,66 - 4,55 = 4,11 \text{ A.}$$

$$S_2 = \frac{4,55}{2,5} = 1,82. \text{ Usa-se fio n.º 14 (AWG) (2,08 mm}^2\text{).}$$

$$S_a = \frac{4,11}{2,5} = 1,65. \text{ Usa-se fio n.º 15 (AWG) (1,65 mm}^2\text{).}$$

$$\text{Pot. Transf./fase} = I_2 (V_2 - V_1) = 4,55 (220 - 127) = 423 \text{ VA}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_t}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{423}{50}} = 7,5 \cdot \sqrt{8,5} = 7,5 \cdot 2,92 = 21,9 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot 21,9 = 24 \text{ cm}^2$$

Seção do núcleo $a = 5$; $b = 5$

$$S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{25}{1,1} = 22,7 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{22,7} = 1,76$$

$$0 - 127) 1,76 \cdot 127 = 224 \text{ esp.}$$

$$127 - 220) 1,76 \cdot 93 \cdot 1,05 = 172 \text{ esp.}$$

$$S_{cu} = 224 \cdot 1,65 + 172 \cdot 2,08 = \\ = 370 + 358 = 727 \text{ mm}^2$$

$$S_j = 2 \cdot S_{cu} \cdot 3,5 = 2 \cdot 727 \cdot 3,5 = \\ = 5089 \text{ mm}^2$$

Fixando-se $L_j = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$

$$\text{Resulta } H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{5089}{50} = \sim \\ \sim 102 \text{ mm} = 10,2 \text{ cm}$$

Executa-se a janela com 10,5 cm de altura.

Peso do ferro $P_{fe} = (20,5 \cdot 25 - 2 \cdot 10,5 \cdot 5) 5 \cdot 0,9 \cdot 7,8 = 14,3 \text{ kg}$

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 5 + 0,5 \cdot 5 \cdot 3,14 = 27,85 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{0,27 \cdot S_{cu} \cdot l_m}{1000} = \frac{0,27 \cdot 727 \cdot 27,85}{1000} = 5,47 \text{ kg}$$

EXEMPLO N.^o 2

Autotransformador trifásico: $f = 50 \text{ Hz}$; $W_{a2} = 2000 \text{ VA}$; $V_1 = 480 \text{ V}$; $V_2 = 220/127 \text{ V}$.

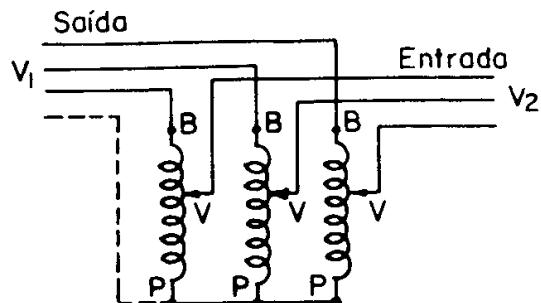


Fig. 159

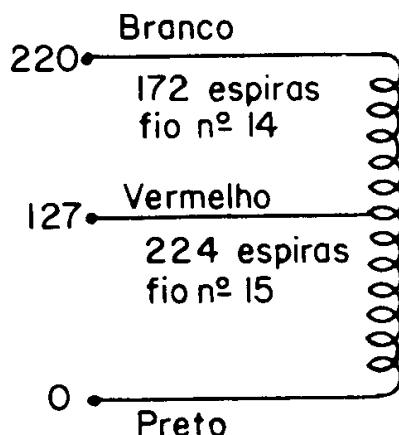


Fig. 160

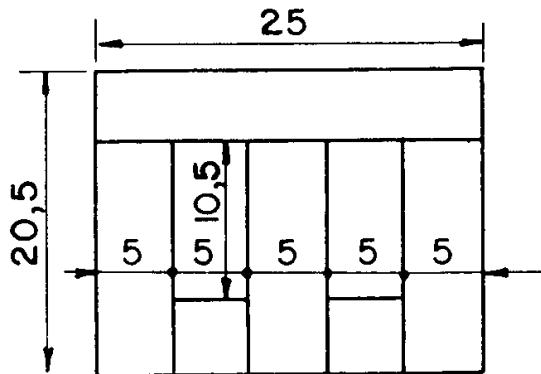


Fig. 161

$$W_2 = \frac{2000}{3} = 666; V_{t2} = 127; I_2 = \frac{666}{127} = 5,24; I_a = 5,24 - 2,65 = 2,59 \text{ A}$$

$$W_1 = 666 \cdot 1,1 = 733; V_{t1} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277; I_1 = \frac{733}{277} = 2,65 \text{ A}$$

$$S_a = \frac{2,59}{3} = 0,865. \text{ Usa-se fio n.º 17 (AWG) (1,04 mm}^2)$$

$$S_1 = \frac{2,65}{3} = 0,885. \text{ Usa-se fio n.º 17 (AWG) (1,04 mm}^2)$$

Pot. Transf/fase = $I_1 (V_1 - V_2) = 2,65 (277 - 127) =$
 $= 2,65 \cdot 150 = 397,5 \text{ VA}$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_t}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{397,5}{50}} = 7,5 \sqrt{7,95} = 7,5 \cdot 2,82 = 21,2 \text{ cm}^2$$

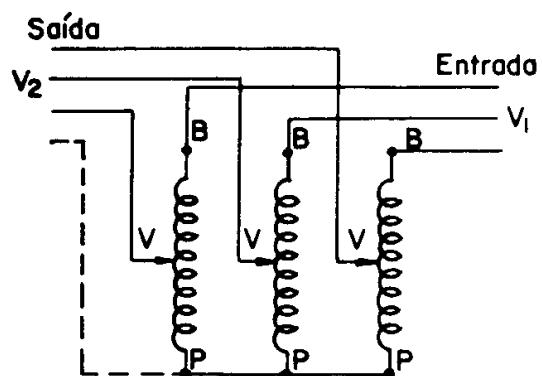


Fig. 162

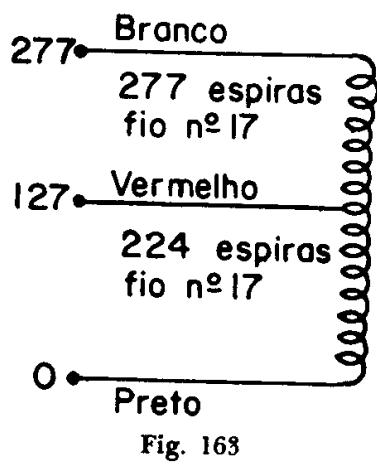


Fig. 163

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 21,2 = 23,3 \text{ cm}^2$$

Seção do núcleo: $a = 5; b = 5$

$$S_g = 5 \cdot 5 = 25 \text{ cm}^2$$

$$S_m = \frac{25}{1,1} = 22,7 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{22,7} = 1,76$$

$$0 - 127) N_B = 1,76 \cdot 127 = 224 \text{ esp.}$$

$$127 - 277) N_A = 1,76 \cdot 150 \cdot 1,05 =$$

$$= 277 \text{ esp.}$$

$$S_{cu} = (224 + 277) \cdot 1,04 = 521 \text{ mm}^2$$

$$S_j = 2 \cdot S_{cu} \cdot 3,5 = 2 \cdot 521 \cdot 3,5 =$$

$$= 3647 \text{ mm}^2$$

Fixando-se $L_j = 40 \text{ mm} = 4 \text{ cm}$

$$\text{Resulta } H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{3647}{40} =$$

$$91,2 \text{ mm} = 9,12 \text{ cm}$$

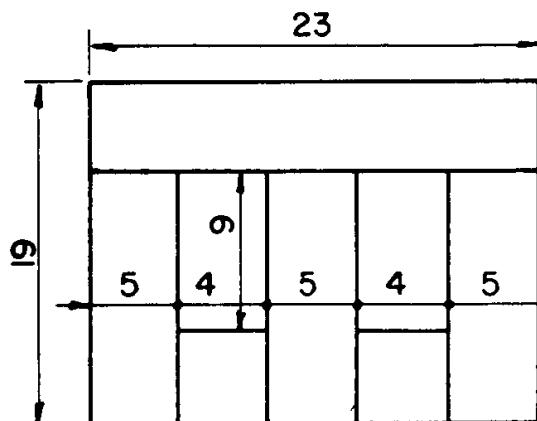


Fig. 164

Executa-se a janela com altura $H_j = 9 \text{ cm}$, conforme fig. 164.

$$P_{fe} = (19 \cdot 23 - 2 \cdot 4 \cdot 9) \cdot 5 \cdot 0,9 \cdot 7,8 = \\ = 12\,811 \text{ g} = 12,8 \text{ kg}$$

$$l_m = 2a + 2b + 0,5\pi a = 27,9 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{0,27 \cdot S_{cu} \cdot l_m}{1000} = \\ = \frac{0,27 \cdot 521 \cdot 27,9}{1000} = 3,9 \text{ kg}$$

47) DISPOSITIVO PARA NEUTRO ARTIFICIAL

Nas instalações trifásicas com três fios ocorre às vezes a necessidade do fio neutro. A única solução possível é a utilização de um dispositivo constituído por três bobinas ligadas em estrela, conforme fig. 165.

A seção dos fios destas bobinas deve ser proporcional à corrente de cada fase.

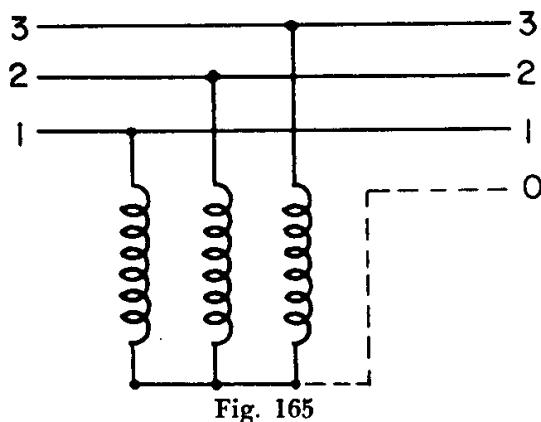


Fig. 165

A seção do núcleo de cada coluna deve ser proporcional à metade da potência nominal de cada fase, pois estes aparelhos só possuem uma bobina por fase.

Quanto ao resto do projeto usam-se as fórmulas empregadas nos cálculos dos transformadores e autotransformadores. Os exemplos indicados a seguir esclarecem melhor o assunto.

48) EXEMPLOS DE CÁLCULO DE DISPOSITIVOS PARA NEUTRO ARTIFICIAL

EXEMPLO N.^o 1

Dispositivo para neutro artificial, para ser utilizado a fim de alimentar uma instalação de iluminação cuja potência total é 5 kW. A tensão concatenada da linha é: $V = 220 \text{ volts}$ e $f = 50 \text{ Hz}$.

$$\text{Potência de cada fase} = \frac{5000}{3} = 1670$$

A tensão de cada bobina é

$$V_t = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$$

A corrente que atravessa cada bobina resulta:

$$I = \frac{1670}{127} = 13,2 \text{ A}$$

$$S = \frac{I}{d} = \frac{13,2}{2,5} = 5,3 \text{ mm}^2$$

Usa-se fio n.º 10 (AWG) cuja seção é $5,26 \text{ mm}^2$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{1670}{2,50}} = 7,5 \sqrt{16,7} = 7,5 \cdot 4,1 = 30,7 \text{ cm}^2$$

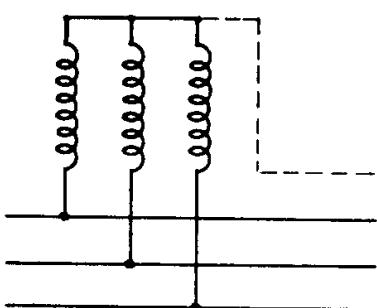


Fig. 166

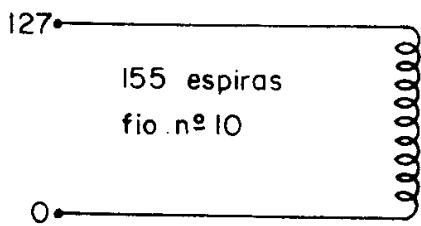


Fig. 167

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 30,7 = 33,8 \text{ cm}^2$$

Seção do núcleo: $a = 6$; $b = 6$

$$S_g = 6 \cdot 6 = 36 \text{ cm}^2$$

$$S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{36}{1,1} = 32,7$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{32,7} = 1,22$$

$$N = 1,22 \times 127 = 155$$

$$S_{eu} = N \cdot S = 155 \cdot 5,26 = 815 \text{ mm}^2$$

$$S_j = 2 \cdot S_{eu} \cdot 3,3 = 2 \cdot 815 \cdot 3,3 = 5379$$

Fixando-se $L_j = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$

$$H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{5379}{50} = 107 \text{ mm} = 10,7 \text{ cm}$$

Executa-se a janela com $H_j = 11$ cm, conforme fig. 168.
 $P_{fe} = (23 \cdot 28 - 2 \cdot 5 \cdot 11) 6 \cdot 0,9 \cdot 7,8 = 22\,492 \text{ g} = 22,492 \text{ kg}$

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 33,4 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{0,27 \cdot S_{cu} \cdot l_m}{1000} =$$

$$= \frac{0,27 \cdot 815 \cdot 33,4}{1000} = 7,35 \text{ kg}$$

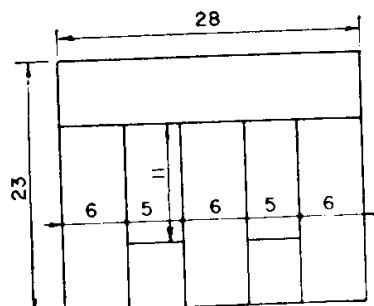


Fig. 168

EXEMPLO N.º 2

Dispositivo para neutro artificial destinado a ser utilizado numa linha trifásica, a fim de alimentar uma instalação de laboratório cuja potência total é 10 kW. A tensão de linha é 220 V e $f = 50$ Hz.

N.B.: A fim de eliminar os efeitos da terceira harmônica, executa-se o agrupamento das fases em ziguezague.

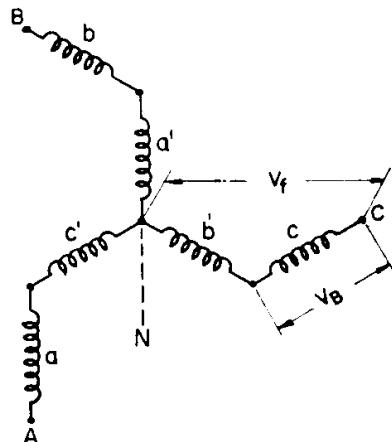
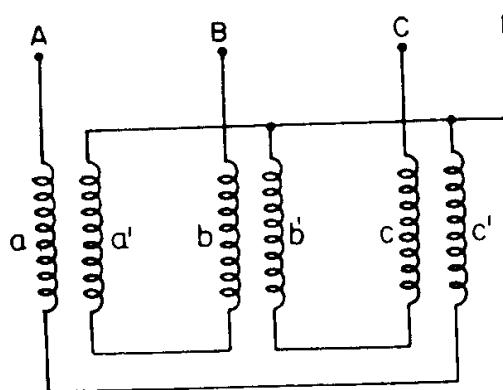


Fig. 169

As ligações serão executadas conforme fig. 169.

Se a tensão concatenada é 220 volts a tensão de fase resulta

$$V_f = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ volts.}$$

Como cada fase é constituída por duas bobinas, cujas f.e.m. estão a 120° entre si, a tensão relativa a cada bobina resulta:

$$V_B = \frac{V_f}{\sqrt{3}} = \frac{127}{\sqrt{3}} = 73,33 \text{ volts}$$

$$\text{Potência de cada fase } W_f = \frac{10000}{3} = 3333 \text{ w}$$

$$I_f = \frac{W_f}{V_f} = \frac{3333}{127} = 26,3 \text{ A.}$$

A seção do condutor resulta $S = \frac{I_f}{d} = \frac{26,3}{2} = 13,1 \text{ mm}^2$. Deveria ser usado fio n.º 6 (AWG), mas como este é muito grosso, resulta difícil o enrolamento do mesmo; usam-se então 2 fios n.º 9 (AWG) em paralelo, cuja seção total é $13,3 \text{ mm}^2$.

Para efeito de cálculo considera-se para cada fase a potência:

$$W_a = 2 \cdot I_f \cdot V_B = 2 \cdot 26,3 \cdot 73,33 = 3857$$

Para o cálculo da seção magnética considera-se a metade desta potência, resultando:

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_a}{2.f}} = 7,5 \sqrt{\frac{3857}{2.50}} = 7,5 \sqrt{38,57} = 7,5 \cdot 6,23 = 46,7 \text{ cm}^2$$

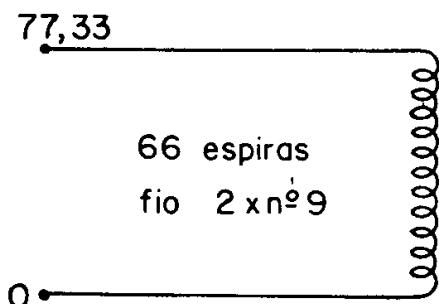


Fig. 170

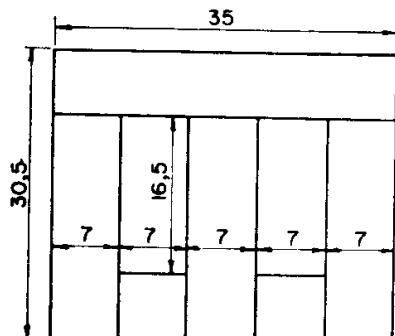


Fig. 171

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 46,7 = 51,37$$

Seção do núcleo $a = 7$; $b = 7$; $S_g = 7 \cdot 7 = 49 \text{ cm}^2$

$$S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{49}{1,1} = 44,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{44,5} = 0,9$$

O número de espiras por bobina resulta:

$$N = 0,9 \cdot V_B = 0,9 \cdot 73,33 = 66 \text{ esp.}$$

$$\text{Em cada coluna } S_{eu} = 2 \cdot N \cdot S = 2 \cdot 66 \cdot 13,3 = 1756 \text{ mm}^2$$

$$S_j = 2 \cdot 1756 \cdot 3,3 = 11590 \text{ mm}^2$$

Fixando-se $L_j = 70 \text{ mm} = 7 \text{ cm}$

$$\text{Resulta } H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{11\,590}{70} = 165,5 \text{ mm} = 16,55 \text{ cm}$$

Executa-se a janela com altura de 16,5 cm, conforme fig. 171.

Peso do ferro = $(30,5 \cdot 35 - 2 \cdot 16,5 \cdot 7) \cdot 7 \cdot 0,9 \cdot 7,8 = 41\,082 \text{ g} = 41,082 \text{ kg}$

$$lm = 2a + 2b + 0,5a\pi = 14 + 14 + 0,5 \cdot 7 \cdot 3,14 = 39 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{0,27 \cdot S_{cu} \cdot lm}{1000} = \frac{0,27 \cdot 1756 \cdot 39}{1000} = 18,49 \text{ kg}$$

CAPÍTULO VI

49) REGULADOR DE TENSÃO COM COMANDO MANUAL

Os reguladores de tensão com comando manual são autotransformadores com várias entradas, que permitem ajustar o número de espiras do circuito primário à tensão de alimentação.

O ajuste do número das espiras primárias é feito por meio de uma chave rotativa, conforme indica a fig. 172, na qual está representado um regulador de tensão de 120 volts. Se o cursor da chave estiver na posição 0, o regulador estará desligado.

Se a tensão de entrada for, por exemplo, 120 volts, o cursor da chave deverá estar na posição (1), na qual a tensão de saída será igual à de entrada.

Se a tensão de alimentação for inferior a 120 volts, 110 volts, por exemplo, para se obter tensão de saída de 120 volts o cursor da chave deverá estar na posição (2), pois nestas condições o aparelho funcionará como autotransformador elevador, com entrada 110 V. e saída 220 V.

Se a tensão for mais baixa que 110 volts, o cursor da chave deverá ser deslocado para uma das posições compreendidas entre (2) e (5).

A escolha da posição do cursor é feita facilmente, observando-se a indicação do voltímetro ligado no circuito secundário do aparelho, pois

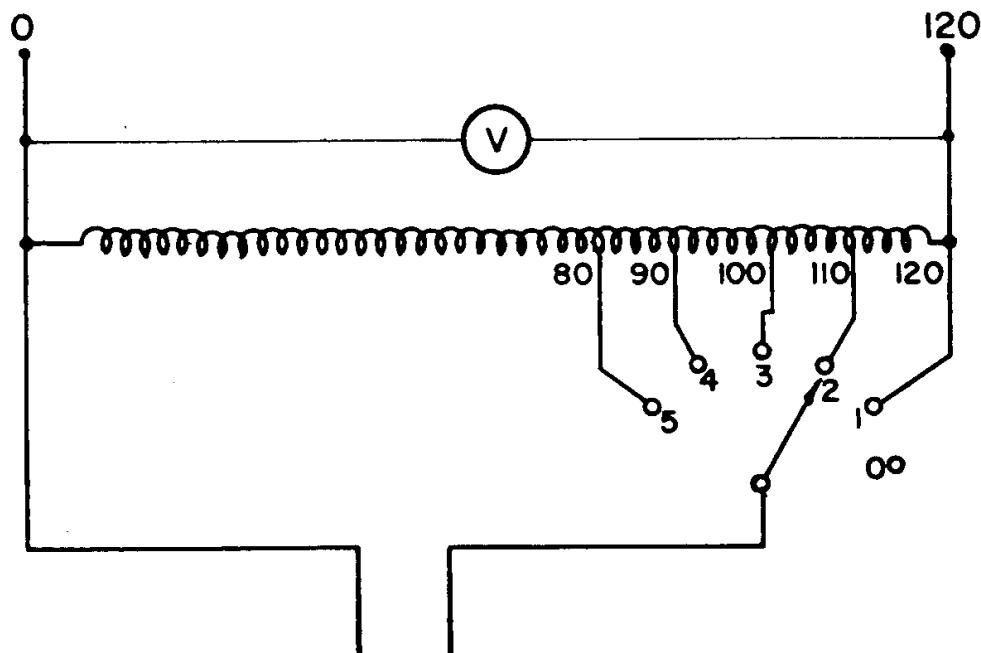


Fig. 172

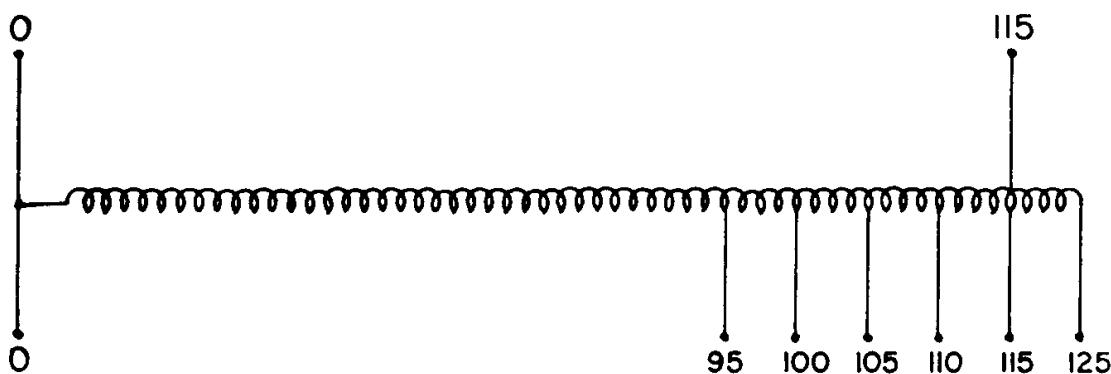


Fig. 173

a posição do cursor é correta quando a tensão indicada pelo voltímetro é aproximadamente de 120 volts, que no caso foi tomada como exemplo.

Quanto mais posições a chave possuir, maior será o grau de regulação do aparelho. Em geral as chaves que se encontram no comércio possuem 10 posições úteis e uma neutra (desligada).

Em geral os reguladores de tensão manuais, além das posições destinadas a elevar a tensão, possuem uma ou duas posições destinadas a reduzir a tensão, isto na previsão da tensão da linha de alimentação alcançar valores superiores ao da nominal.

A fig. 173 representa esquematicamente o enrolamento de um regulador manual do qual se exige a tensão de saída de 115 volts, enquanto a tensão de entrada varia entre 95 e 125 volts.

Este tipo de regulador é caracterizado por 4 posições de aumento e uma de redução da tensão.

O regulador indicado na fig. 174 é caracterizado por 7 posições de aumento e duas de redução da tensão. O mesmo pode fornecer a tensão de 115 volts, enquanto a tensão de entrada varia entre 50 e 130 volts. O mencionado regulador utiliza uma chave de 10 posições ativas.

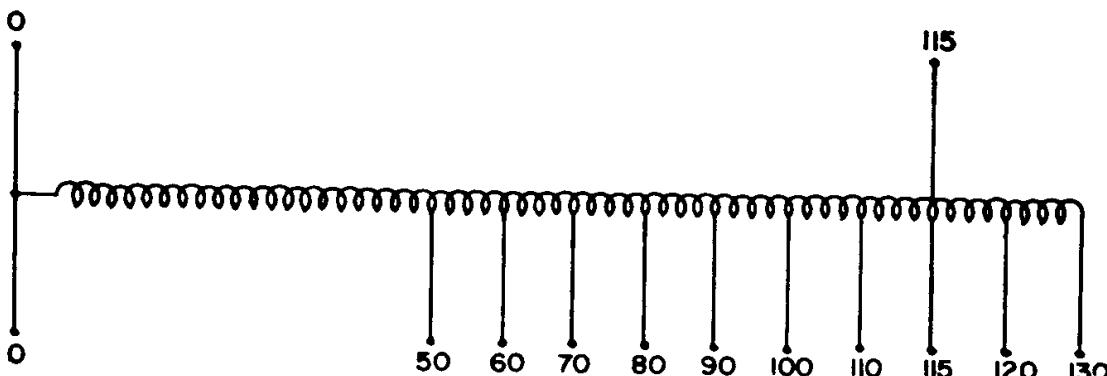


Fig. 174

50) REGULADOR DE TENSÃO COM COMANDO AUTOMÁTICO

O regulador de tensão com comando automático estruturalmente é parecido com o regulador comandado manualmente, com a diferença, porém, de que o comando é feito por dispositivo térmico ou magnético.

O dispositivo térmico é realizado à base de bimetal, com aquecimento indireto produzido pela tensão do circuito primário.

O regulador da fig. 175 é do tipo térmico. Se a tensão de entrada for de 125 volts, os três relés estarão deslocados para a direita.

O autotransformador está inativo pois a ligação do circuito de entrada com o de saída é direta.

Se a tensão primária baixar mais que 110 volts, o relé (1) desviará para a esquerda e a linha primária atuará na posição (110). Por efeito do autotransformador o valor da tensão de saída é 125 volts.

Se a tensão primária baixar mais que 95 volts, o relé (2) desviar-se-á para a esquerda e a linha primária atuará na posição (95). O valor da tensão de saída volta a ser 125 volts.

Se a tensão primária baixar mais que 80 volts o relé (3) desviará para a esquerda e a linha primária atuará na posição (80). O valor da tensão de saída volta a ser 125 volts. Ao elevar-se da tensão de entrada ocorre a regulação inversa da que foi examinada.

O diagrama da fig. 176 mostra como varia a tensão de saída ao variar a tensão de entrada.

A tensão de saída varia entre 125 e 110 volts, enquanto a tensão de entrada varia entre 125 e 65 volts. Para tensões de entrada inferiores a 65 volts, a tensão de saída não será mais compensada e diminuirá proporcionalmente.

O dispositivo de comando térmico é de construção simples, mas apresenta o inconveniente de não ser de ação instantânea, por causa de sua inércia térmica, isto é, aquece lentamente e esfria lentamente. Em geral, são necessários pelo menos 30 segundos para o relé térmico entrar em ação, o que não o recomenda para reguladores de tensão destinados a circuitos sensíveis, como, por exemplo, os que alimentam rádios, televisões, vitrolas, etc.

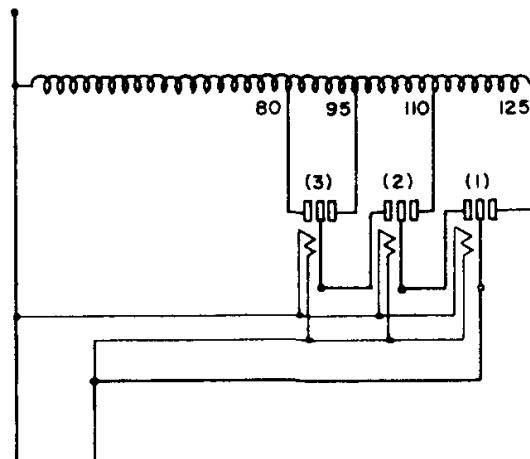


Fig. 175

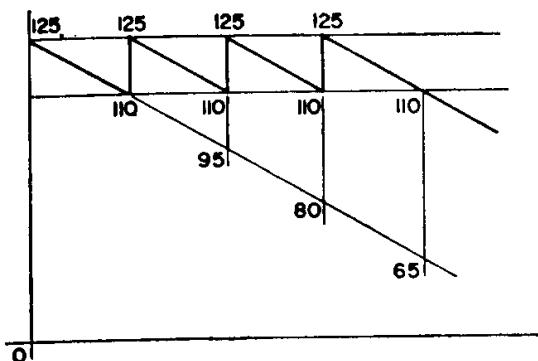


Fig. 176

O dispositivo de comando magnético é mais sensível, de efeito instantâneo, mas de construção complicada.

Em geral os relés desviadores são comandados por pequenos relés seletores de alta sensibilidade e precisão. A fim de aumentar a sensibilidade e a precisão dos relés seletores, prefere-se alimentá-los com corrente contínua, obtida por meio de retificadores alimentados pela tensão de entrada do regulador.

A fig. 177 indica a disposição de um regulador de tensão com comando magnético, destinado a efetuar a mesma regulação do aparelho indicado na fig. 175.

Os relés desviadores (1), (2) e (3) são alimentados com corrente alternada e comandados pelos relés seletores (a), (b) e (c), que são alimentados com corrente contínua.

A corrente contínua é obtida com quatro retificadores ligados em forma de ponte. A fim de nivelar a corrente contínua, emprega-se uma

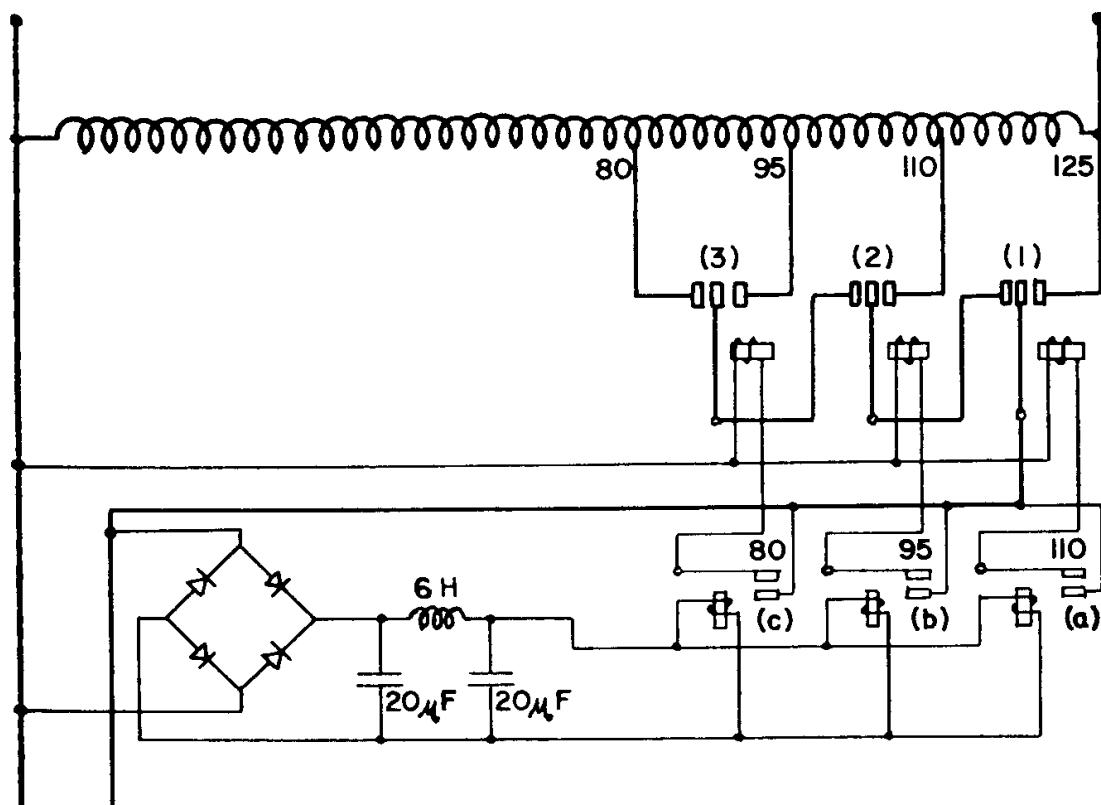


Fig. 177

bobina de reatância de 6 Henry e dois condensadores eletrolíticos de 20 microfarad.

Se a tensão de entrada for 125 volts, os relés (a), (b) e (c) estarão fechados e os relés desviadores (1), (2) e (3) estarão desviados para a direita.

Nestas condições o autotransformador permanece inativo, pois a linha de entrada está diretamente ligada à de saída.

Se a tensão de entrada alcançar valores inferiores a 110 volts, o relé seletor (a) abrirá e o relé desviador (1) desviar-se-á para a esquerda, ligando a linha de entrada na posição (110). Por efeito do autotransformador, o valor da tensão de saída volta a ser 125 volts.

Se a tensão de entrada ficar mais baixa que 95 volts, o relé seletor (b) abrir-se-á e o relé desviador (2) desviar-se-á para a esquerda, ligando a linha primária na posição (95). O valor da tensão de saída volta a ser 125 volts.

E, por fim, se a tensão de entrada ficar mais baixa que 80 volts, o relé seletor (c) abrir-se-á e o relé desviador (3) desviar-se-á para a esquerda, ligando a linha de entrada na posição (80). O valor da tensão de saída volta a ser 125 volts.

A variação da tensão de saída é a indicada pelo diagrama da fig. 176, a qual mostra que, variando a tensão de entrada entre 125 e 65 volts, a tensão de saída varia entre 125 e 110 volts.

51) EXEMPLOS DE CÁLCULOS DOS REGULADORES DE TENSÃO

O esquema de cálculo dos reguladores de tensão é análogo ao dos autotransformadores monofásicos, tomando-se como tensão primária a menor tensão do circuito de alimentação e como tensão secundária a que se deseja obter no circuito utilizador.

Nos reguladores de tensão não se aumenta de 5% o número das espiras secundárias como nos autotransformadores.

Em geral as espiras destinadas às posições de redução da tensão devem ser feitas com fio fino, mas sendo pequeno este número, costuma-se enrolar estas espiras com o fio com que foram enroladas as demais espiras.

Os exemplos indicados a seguir esclarecem melhor os conceitos expostos.

EXEMPLO N.^o 1

Regulador de tensão monofásico: $f = 50$ Hz; $W_2 = 300$ VA; Tensão de entrada $V_1 = 75/130$ volts; Tensão de saída $V_2 = 115$ volts. Chave com 10 posições úteis. Haverá uma posição redutora.

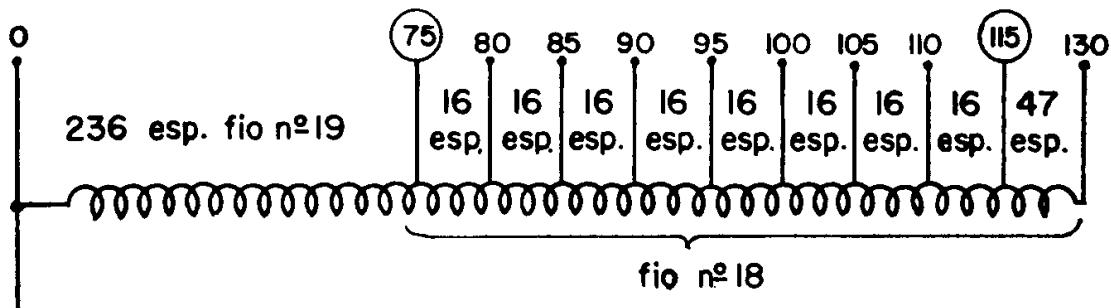


Fig. 178

O esquema do enrolamento, completado com os dados construtivos, está indicado na fig. 178.

Para o cálculo das correntes e da seção dos condutores, considera-se o aparelho como um autotransformador, com $V_1 = 75$ volts e $V_2 = 115$ volts; assim sendo, resulta:

$$W_2 = 300; V_2 = 115; I_2 = \frac{300}{115} = 2,6 \text{ A.}$$

$$W_1 = 330; V_1 = 75; I_1 = \frac{330}{75} = 4,4 \text{ A}; I_a = 4,4 - 2,6 = 1,8 \text{ A}$$

$$S_2 = \frac{I_2}{4} = \frac{2,6}{3} = 0,86; \text{ fio n.º 18 (AWG)} (S = 0,82 \text{ mm}^2)$$

$$S_a = \frac{I_a}{d} = \frac{1,8}{3} = 0,6; \text{ fio n.º 19 (AWG)} (S = 0,65 \text{ mm}^2)$$

Potência transformada = $I_2(V_2 - V_1)$. Como tensão secundária considera-se $V_2 = 130$ volts, resulta assim:

$$\text{Potência transformada} = I_2(V_2 - V_1) = 2,6 (130 - 75) = 2,6 \cdot 55 = 143 \text{ VA}$$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_t}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{143}{50}} = 7,5 \sqrt{2,86} = 7,5 \cdot 1,69 = 12,7 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m = 1,1 \cdot 12,7 = 14 \text{ cm}^2. \text{ Núcleo: } a = 3,5; b = 4$$

$$S_g = 3,5 \times 4 = 14 \text{ cm}^2; S_m = \frac{14}{1,1} = 12,7; \text{ Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{12,7} = 3,15$$

Círculo 0 — 75) $N = 3,15 \cdot 75 = 236$ esp.

Para intervalo de 5 volts) $= 3,15 \cdot 5 = 16$ esp.

Para intervalo de 15 volts) $N = 3,15 \cdot 15 = 47$ esp.

$$S_{cu} = N_1 I_2 + N_2 I_2 = 236 \cdot 0,65 + (16 \cdot 8 + 47) \cdot 0,82 = \\ = 153 + 143,5 = 297 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_1}{S_{cu}} = \frac{900}{297}$$

$\frac{S_1}{S_{cu}} = \frac{900}{297} = 3$. Execução possível. Peso do ferro $P_{fe} = 0,516 \cdot 4 = 2,064 \text{ kg}$

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 7 + 8 + 0,5 \cdot 3,5 \cdot 3,14 = 20,5 \text{ cm}$$

$$\text{Peso do cobre } P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot l_m \cdot 9 = \frac{297}{100} \cdot 20,5 \cdot 9 = 548 \text{ g}$$

EXEMPLO N.^o 2

Regulador de tensão monofásico: $f = 50 \text{ Hz}$; $W_2 = 1500 \text{ VA}$; $V_1 = 50/130$ volts; $V_2 = 115$ volts; Chave com 10 posições úteis. Haverá duas posições de redução.

O esquema do enrolamento, completado com dados construtivos, está indicado na fig. 179.

$$W_2 = 1500 \quad \left| V_2 = 115 \quad \left| I_2 = \frac{1500}{115} = 13 \text{ A} \right. \right| \\ W_1 = 1500 \cdot 1,1 = 1650 \quad \left| V_1 = 50 \quad \left| I_1 = \frac{1650}{50} = 33 \text{ A} \quad \left| I_a = I_1 - I_2 = 33 - 13 = 20 \text{ A} \right. \right. \right|$$

$$S_2 = \frac{I_2}{d} = \frac{13}{2,5} = 5,2 \text{ mm}^2; \text{ Usa-se fio n.º 10 (AWG)} (S = 5,26 \text{ mm}^2).$$

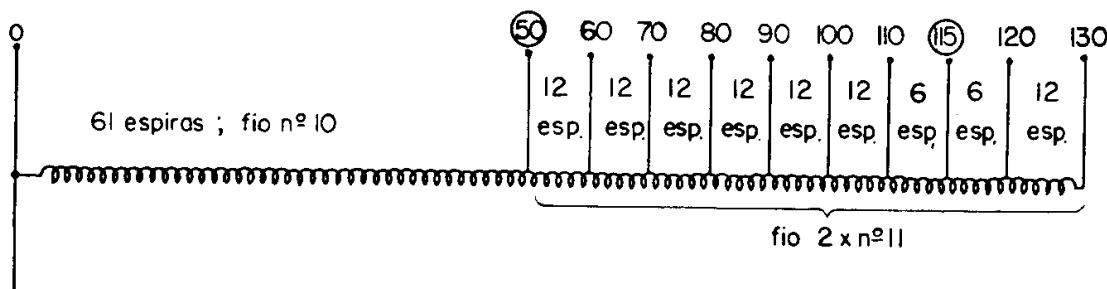


Fig. 179

$S_a = \frac{I_a}{d} = \frac{20}{2,5} = 8 \text{ mm}^2$; Usa-se fio n.^o 8 (AWG) ($S = 8,37 \text{ mm}^2$) ou dois fios n.^o 11 em paralelo.

Potência transformada = $I_2(V_2 - V_1)$

Como tensão secundária considera-se $V_2 = 130$ volts, resultando

$$W_t = I_2(V_2 - V_1) = 13(130 - 50) = 13 \cdot 80 = 1040 \text{ VA}$$

$$S_m = \sqrt{\frac{W_t}{f}} = 7,5 \sqrt{\frac{1040}{50}} = 7,5 \cdot 4,45 = 34 \text{ cm}^2$$

$$S_g = S_m \cdot 1,1 = 34 \cdot 1,1 = 37,3 \text{ cm}^2; \text{ Núcleo: } a = 6; b = 6$$

$$S_g = 6 \cdot 6 = 36 \text{ cm}^2; S_m = \frac{S_g}{1,1} = \frac{36}{1,1} = 32,7 \text{ cm}^2;$$

$$\text{Esp/volt} = \frac{40}{S_m} = \frac{40}{32,7} = 1,22$$

Círculo 0 — 50) $N = 1,22 \cdot 50 = 61$ esp.

Para intervalo de 10 volts) $N = 1,22 \cdot 10 = 12,2$ esp. = ~ 12 esp.

Para intervalo de 5 volts) $N = 6$ esp.

$$S_{cu} = N_1 \cdot S_1 + N_2 \cdot S_2 = 61 \cdot 8,37 + (7 \cdot 12 + 2 \cdot 6) 5,26 = 510,6 + 505 = 1015,6 \text{ mm}^2$$

$$S_j = S_{cu} \cdot 3,2 = 1015,6 \cdot 3,2 = 3250 \text{ mm}^2$$

Fixando-se a largura da janela $H_j = 30 \text{ mm} = 3 \text{ cm}$, conforme fig. 180.

$$\text{Resulta: } H_j = \frac{S_j}{L_j} = \frac{3250}{30} = 108,3 \text{ mm} = 10,83 \text{ cm}$$

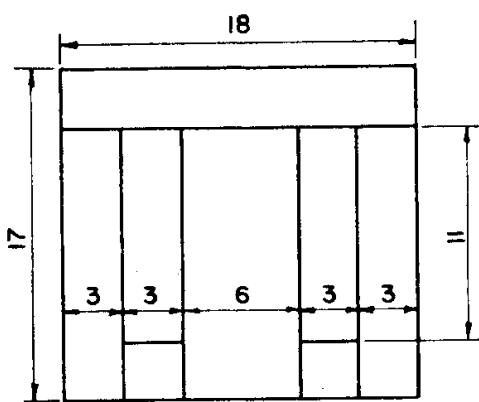


Fig. 180

Executa-se a janela com $H_j = 11 \text{ cm}$

$$P_{fe} = (18 \cdot 17 - 2 \cdot 3 \cdot 11) 6 \cdot 0,9 \cdot 7,8 = 10109 \text{ g} = 10,109 \text{ kg}$$

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi = 2 \cdot 6 + 2 \cdot 6 + 0,5 \cdot 6 \cdot 3,14 = 33,5 \text{ cm}$$

$$P_{cu} = \frac{S_{cu}}{100} \cdot l_m \cdot 9 = \frac{1015,6}{100} \cdot 33,5 \cdot 9 = 3062 \text{ g} = 3,062 \text{ kg}$$

52) ESTABILIZADORES AUTOMÁTICOS DE TENSÃO

Uma linha com tensão variável pode ser estabilizada automaticamente instantaneamente com o emprego de um aparelho provido de associação adequada de indutância e capacidade. Este aparelho é desprovido de válvulas, relés ou partes móveis.

O princípio de funcionamento deste aparelho estabilizador de tensão é relacionado com o princípio que rege o processo de correção das quedas de tensão, numa linha de transmissão por meio de condensador no fim da mesma, conforme fig. 181.

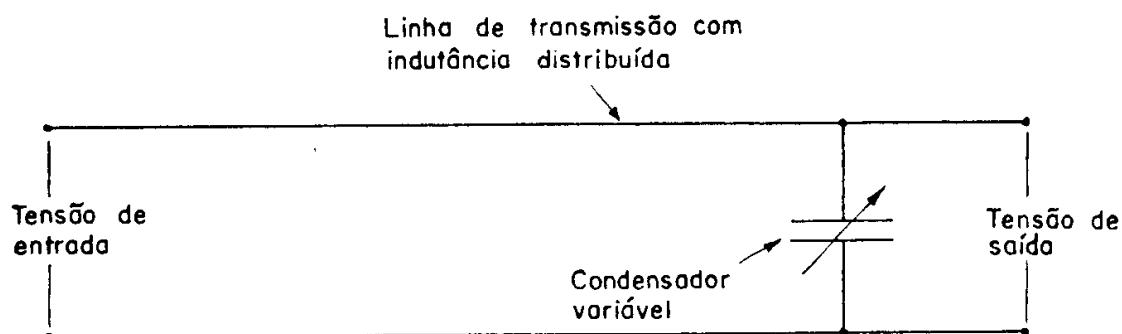


Fig. 181

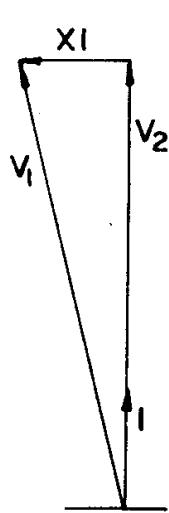


Fig. 182

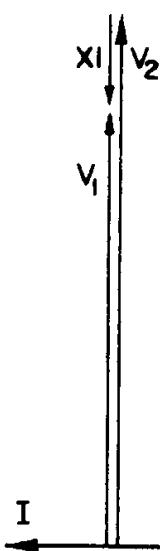


Fig. 183

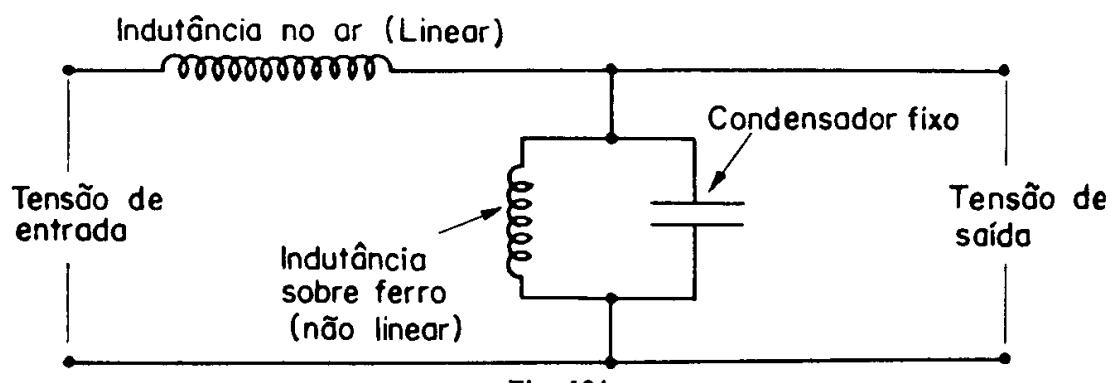
Se através da indutância da linha passa uma corrente I em fase com a tensão V_2 , produz-se uma queda de tensão XI , defasada em adiantamento sobre I de 90° , conforme fig. 182. Nestas condições V_2 é menor que V_1 .

Se a corrente for defasada em adiantamento sobre V_2 , o que se verifica com carga capacitativa, a queda de tensão XI , que é defasada em adiantamento sobre a corrente I , fará com que V_2 resulte maior que V_1 , conforme fig. 183.

Nas condições expostas, o valor XI em lugar de ter características de quedas de tensão, tem características de elevação de tensão.

A corrente absorvida pelo condensador, atravessando a indutância distribuída ao longo da linha, provoca um aumento de tensão.

Ajustando-se a capacidade do condensador sempre que a tensão de entrada varia, o aumento de voltagem pode ser controlado ao ponto de ficar estabilizada a tensão de saída.



Uma forma equivalente do estabilizadör antes descrito está representada na fig. 184, pois possui os mesmos elementos indicados na fig. 181.

A fonte de corrente capacitiva variável é fornecida automaticamente por uma combinação paralela de um condensador fixo e uma bobina enrolada sobre um núcleo de ferro (indutância não linear).

Uma redução da tensão de entrada reduz a corrente do condensador e a da indutância sobre ferro. Se o circuito magnético no ferro for saturado, na indutância enrolada sobre o mesmo, verificar-se-á uma elevada redução na corrente enquanto no condensador a diminuição da corrente será pequena.

Nestas condições prevalece a corrente capacitiva sobre a corrente indutiva. A corrente resultante, com características capacitivas, ao atravessar a indutância linear provoca uma elevação da tensão e portanto a tensão de saída sofre unicamente pequenas variações que em geral são insignificantes.

Se a tensão de entrada aumentar além de seu valor normal, verificar-se-á um fenômeno oposto, isto é, prevalecerá a corrente indutiva e portanto na indutância linear verificar-se-á uma queda de tensão e a tensão de saída continuará aproximadamente com o mesmo valor.

Para ilustrar o fenômeno examina-se o diagrama da fig. 185. Supõe-se que a tensão varie do valor A para o valor B.

Na indutância a corrente sofre a diminuição ΔI_B e no condensador a diminuição ΔI_C .

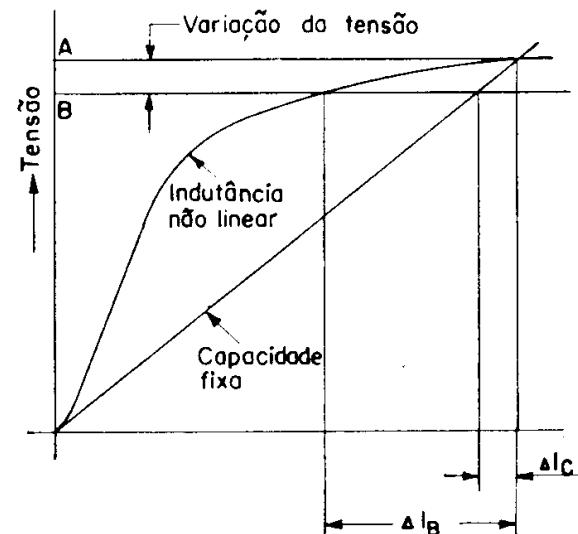


Fig. 185

ESTABILIZADOR GENERAL ELECTRIC

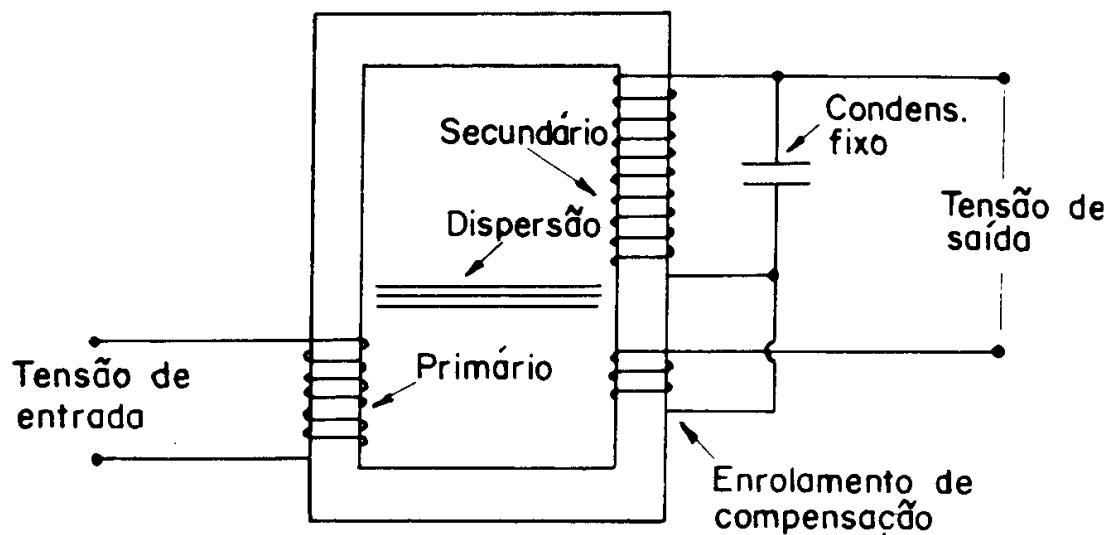


Fig. 186

É evidente que por ser a diminuição da corrente no condensador muito pequena, a corrente capacitativa prevalece sobre a corrente da bobina e o circuito adquire características capacitivas, verificando-se o fenômeno antes exposto.

A indutância e o condensador podem ser separados, conforme a fig. 184, ou agrupados, conforme as figs. 186 e 187.

A indutância de dispersão entre o circuito primário e o secundário proporciona a indutância linear.

ESTABILIZADOR SOLA

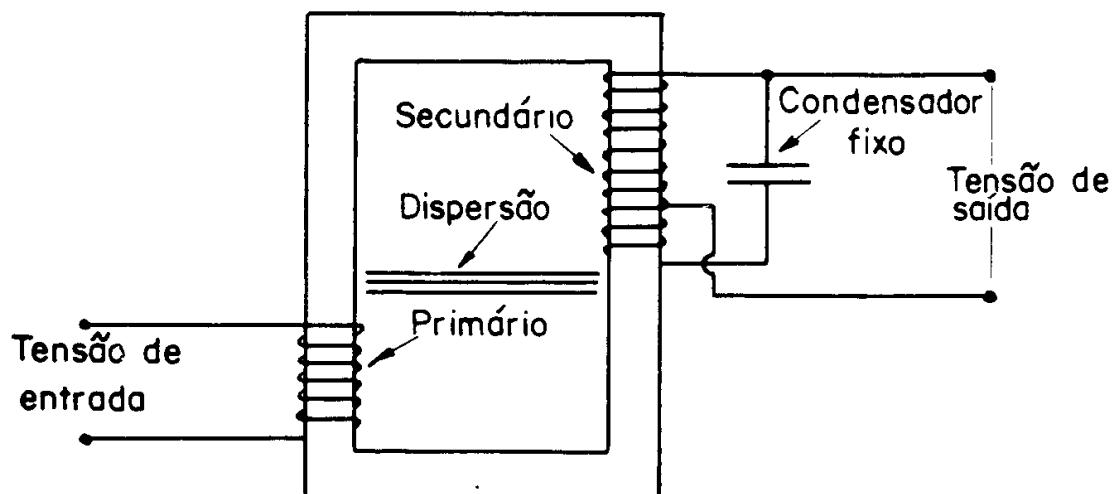


Fig. 187

O enrolamento secundário e o respectivo núcleo fornecem a induância não linear.

Eletromagneticamente, o dispositivo General Electric é análogo ao Sola.

O enrolamento de compensação do aparelho General Electric age em oposição ao secundário; assim sendo, quando a tensão de entrada diminui, diminui também a oposição. Quando a tensão de entrada aumenta, aumenta também a oposição.

Com este dispositivo se obtém uma tensão de saída praticamente constante.

Em geral a indução no núcleo da indutância não linear deve ser da ordem de 14 000 ou 15 000 gauss.

CAPÍTULO VII

NORMAS; DEFINIÇÕES E CONSIDERAÇÕES SOBRE TRANSFORMADORES PARA REDES DE TRANSMISSÃO E DE DISTRIBUIÇÃO

53) NORMAS:

Os transformadores fabricados no Brasil obedecem às previsões da EB-91 (Especificações Brasileiras 91) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

54) DEFINIÇÕES:

a) *Transformador seco (S)*

Transformador cujo núcleo e enrolamentos estão envoltos e refrigerados pelo ar ambiente.

b) *Transformador em líquido isolante (L)*

Transformador cujo núcleo e enrolamentos são imersos em líquido isolante.

c) *Transformador para interior*

Transformador que, pela sua construção, não pode ser instalado ao tempo.

d) *Transformador para exterior*

Transformador que, pela sua construção, pode ser instalado ao tempo.

e) *Transformador para poste*

Transformador projetado de forma a ser instalado em poste ou suporte equivalente.

f) *Transformador para plataforma*

Transformador projetado de forma a ser instalado em plataforma ou suporte equivalente.

g) *Transformador para estação*

Transformador de construção adequada a ser instalado em estação.

h) *Transformador subterrâneo*

Transformador de construção resistente à umidade e à eventual submersão em água em condições especificadas de tempo e

pressão externa, projetado para instalação em câmaras subterrâneas.

i) *Potência nominal de um transformador*

Potência indicada e garantida pelo fabricante do transformador, de acordo com a Norma Técnica correspondente ao transformador em questão, para a qual este é projetado e construído.

55) POTÊNCIAS NOMINAIS PADRONIZADAS

Os fabricantes brasileiros produzem em suas linhas de montagem padronizadas, transformadores com as potências indicadas na tabela da fig. 188.

TIPO DE TRANSFORMADORES	POTÊNCIAS NOMINAIS PADRONIZADAS EM kVA	
	TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS
SECOS	5; 7,5; 10; 15; 25; 37,5;	10; 15; 30; 45; 75
Em líquido isolante	83 333; 50 000; 33 333; 25 000; 16 667; 12 500; 8 333; 5 000; 3 333; 2 500; 1 667; 1 250; 833; 667; 100; 75; 50; 37,5; 25; 15; 10; 5	100 000; 75 000; 60 000; 50 000; 37 500; 30 000; 25 000; 20 000; 15 000; 12 000; 10 000; 7 500; 5 000; 3 750; 2 500; 2 000; 1 500; 1 000; 750; 500; 300; 225; 150; 112,5; 75; 45; 30; 15

Fig. 188

56) CLASSE DE TENSÃO DE ISOLAMENTO

A classe de tensão de isolamento é o valor eficaz da tensão que caracteriza a capacidade de um equipamento elétrico em suportar ensaios de tensão especificados nas Normas desse equipamento.

As classes de tensão de isolamento dos transformadores, fabricados no Brasil, estão indicadas na tabela da fig. 189.

**Classes de tensão de isolamento nominais.
Tensões de linha. Espaçamentos mínimos no ar.**

Classe de tensão de isolamento nominal kV	Tensão de linha (valor eficaz) V_1	Espaçamentos mínimos no ar De fase para terra mm
0,6	até 660	—
1,2	até 1320	25
5	1321 a 5500	65
8,7	5501 a 9570	90 a 100
15-B*	9571 a 16 500	130 a 140
15		150 a 170
25	16 501 a 26 250	200 a 230
34,5	26 251 a 36 225	300 a 330
46	36 226 a 48 300	380 a 430
69	48 301 a 72 450	600 a 650
92	72 451 a 96 600	750 a 850
138-B	96 601 a 144 900	950 a 1050
138		1100 a 1250
161-B	144 901 a 169 050	1100 a 1250
161		1300 a 1450
230-B ₂		1500 a 1650
230-B ₁	169 051 a 241 500	1600 a 1800
230		1950 a 2150
345-B ₂		Ainda não normalizados
345-B ₁	241 501 a 362 250	
345		
440-B ₂		Ainda não normalizados
440-B ₁	362 251 a 462 000	
440		

* B — Nível de isolamento "baixo" permitido pelas Normas.

Fig. 189

57) CLASSE DE ISOLAMENTO

A classe de isolamento é definida pelo material isolante empregado no transformador e determina a temperatura máxima que pode ser alcançada, conforme fig. 190.

CLASSE DE ISOLAMENTO		
Temperatura máxima	Designação da classe	Alguns materiais representativos da classe
90°C	0	Algodão, seda e papel não impregnados.
105°C	A	Algodão, seda e papel impregnados ou revestidos ou quando imersos em líquido isolante. Esmaltes e vernizes imersos em líquido isolante.
130°C	B	Mica, fibra de vidro e asbesto, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de temperatura correspondentes.
155°C	F	Mica, fibra de vidro e asbesto, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de temperatura correspondentes.
180°C	H	Elastômeros de silicatos, mica, fibra de vidro e asbesto, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de temperatura correspondentes.
Acima de 180°C	C	Materiais formados inteiramente por mica, porcelana, vidro, quartzo e materiais semelhantes.

Fig. 190

58) TEMPERATURA DE REFERÊNCIA E ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA

a) *Do ar ambiente*

Os transformadores operam conforme suas características nominais, de acordo com as normas, desde que a temperatura ambiente não exceda:

- 1) média, por 24 horas: 30°C
- 2) máxima: 40°C

58.2 — Da água refrigerante

Os transformadores resfriados com água operarão satisfatoriamente quando a temperatura do líquido refrigerante não exceder:

- 1) média, por 24 horas: 25°C
- 2) máxima: 30°C
- c) *Elevação de temperatura dos elementos*

Nos transformadores, operando com suas características nominais, em altitude até 1000 metros, a elevação de temperatura de seus elementos não deve ultrapassar os limites indicados pela tabela da fig. 191.

Tipos de transformador	Classe de material isolante	Elevações de temperatura permissíveis			
		Dos enrolamentos		Do líquido isolante	Das partes metálicas em contato com o isolamento
		Por variação da resistência	Por medida no ponto mais quente		
Em líquido isolante	Sem conservador	105°C	55°C	65°C	50°C
	Com conservador	105°C	55°C	65°C	55°C
Seco	105°C	55°C	65°C	—	65°C
	130°C	80°C	90°C	—	90°C
	155°C	105°C	115°C	—	115°C

Fig. 191

59) TENSÃO DE CURTO-CIRCUITO

Conforme parágrafo 18, a tensão de curto-círcuito é a que deve ser aplicada a um enrolamento para que a corrente deste enrolamento adquira valor igual à sua corrente nominal, estando o outro enrolamento em curto-círcuito.

Esta tensão é expressa em percentagem da tensão nominal do enrolamento a que é referida e coincide com o valor numérico da impedância percentual do transformador.

A tensão de curto-circuito (V_{cc}) é sempre referida a:

- a) a maior relação de transformação que pode ser obtida;
- b) a freqüência nominal;
- c) a temperatura de 75°C para transformadores em óleo ou a temperatura de 115°C para transformadores secos.

60) CORRENTE DE EXCITAÇÃO (CORRENTE A VAZIO)

É a corrente que circula num dos enrolamentos do transformador quando este é alimentado pela tensão e freqüência nominais, estando o outro enrolamento com circuito aberto.

A corrente de excitação é expressa com percentagem do valor da corrente nominal do enrolamento a que é referida.

O cálculo da corrente a vazio está exposto no parágrafo 12.

61) POLARIDADE E DESLOCAMENTO ANGULAR — Este assunto está tratado no parágrafo 36.

62) REGULAÇÃO — Este assunto está tratado no parágrafo 22.

63) RENDIMENTO — Este assunto está tratado no parágrafo 24.

64) FREQÜÊNCIA — As freqüências nominais recomendadas são 50 ou 60 Hz.

65) PLACA DE IDENTIFICAÇÃO

a) Cada transformador deve ser provido de uma placa de identificação colocada no tanque, do mesmo lado das buchas de baixa tensão, contendo as seguintes indicações:

- 1) a palavra "TRANSFORMADOR" ou "AUTOTRANSFORMADOR";
- 2) nome do fabricante e local de fabricação;
- 3) número de série de fabricação;
- 4) designação e data da especificação ABNT;
- 5) tipo (do fabricante);
- 6) número de fases;

- 7) potência ou potências nominais (em kVA) e o respectivo tipo de transformador quanto ao meio refrigerante e ao processo de resfriamento;
 - 8) diagramas de ligações contendo todas as tensões nominais;
 - 9) freqüência nominal;
 - 10) elevação de temperatura dos enrolamentos acima do meio refrigerante e o correspondente regime;
 - 11) polaridade (para transformadores monofásicos) ou diagrama vetorial (para transformadores trifásicos);
 - 12) impedância percentual referida a 75°C para as classes de temperatura de 105°C e 130°C e referida a 115°C para a classe de temperatura de 155°C. Indicando para cada impedância percentual as respectivas freqüências, tensões nominais máximas e potência nominal de referência;
 - 13) tipo do líquido isolante e quantidade necessária em litros;
 - 14) peso total aproximado, em kg. Nos transformadores em líquido isolante com peso total superior a 1500 kg, a placa de identificação deve conter, além da indicação deste peso total, o seguinte:
 - peso da parte ativa
 - peso do tanque e acessórios
 - peso do líquido isolante
 - 15) classes de tensão de isolamento nominais;
 - 16) número do livro de instruções fornecido pelo fabricante junto com o transformador;
 - 17) número de patente ou privilégio de fabricação (se houver).
- b) Para transformadores com resfriamento a água, a vazão deve ser indicada na placa de identificação.

66) ENSAIOS

Os ensaios previstos nas normas, aos quais devem ser submetidos os transformadores, são:

- a) *Ensaios de rotina*, obrigatoriamente feitos pelo fabricante em todas as unidades, que são:
 - 1) resistência ôhmica dos enrolamentos;
 - 2) relação de tensões;

- 3) resistência de isolamento;
- 4) polaridade;
- 5) deslocamento angular;
- 6) seqüência das fases;
- 7) perdas (em vazio, em curto-circuito e totais);
- 8) corrente de excitação;
- 9) tensão de curto-circuito;
- 10) tensão aplicada ao dielétrico;
- 11) tensão induzida;
- 12) estanqueidade e resistência à pressão (em transformadores subterrâneos e submersíveis).
- b) *Ensaios de tipo*, executados somente no protótipo de uma série, que são:
- 1) ensaios dielétricos (tabelas das figs. 192 e 193);
 - 2) fator de potência do isolamento;
 - 3) elevação da temperatura;
 - 4) impulso;
 - 5) nível de ruído;
 - 6) nível de tensão de rádio-ruído.

TRANSFORMADORES SECOS — VALORES PARA ENSAIOS DIELÉTRICOS

Classe de tensão de isolamento nominal kV	Nível de impulso (NI) kV (crista)	Ensaios com freqüência industrial durante 1 min (valor eficaz) em kV	Ensaios de impulso (valor da crista)		
			Com onda cortada		Com onda plena
			kV	Tempo mínimo de corte μ s	
0,6	—	2,5	—	—	—
1,2	10	4	10	1,0	10
5	25	12	25	1,0	25
8,7	35	19	35	1,0	35
15	50	31	50	1,25	50

Fig. 192

**TRANSFORMADORES EM LÍQUIDO ISOLANTE –
VALORES PARA ENSAIOS DIELÉTRICOS**

Classe de tensão de isolamento nominal kV	Nível de impulso (NI) kV (crista)	Ensaios com freqüência industrial durante 1 min (valor eficaz) em kV	Ensaios de impulso (valor de crista)		
			Com onda cortada		Com onda plena
			kV	Tempo mínimo de corte μ s	kV
0,6	—	4	—	—	—
1,2	30	10	36	1,0	30
5	60	19	69	1,5	60
8,7	75	26	88	1,6	75
15 B*	95	34	110	1,8	95
15	110	34	130	2,0	110
25	150	50	175	3,0	150
34,5	200	70	230	3,0	200
46	250	95	290	3,0	250
69	350	140	400	3,0	350
92	450	185	520	3,0	450
138 B	550	230	630	3,0	550
138	650	275	750	3,0	650
161 B	650	275	750	3,0	650
161	750	325	865	3,0	750
230 B ₂	825	360	950	3,0	825
230 B ₁	900	395	1035	3,0	900
230	1050	460	1210	3,0	1050
345 B ₂	1175	510	1350	3,0	1175
345 B ₁	1300	570	1500	3,0	1300
345	1425	630	1640	3,0	1425
440 B ₂	1425	630	1640	3,0	1425
440 B ₁	1550	680	1785	3,0	1150
440	1675	740	1925	3,0	1675

* B — Nível de isolamento “baixo” permitido pelas Normas.

67) FINALIDADE DE ENSAIOS DE TENSÃO

- a) *Ensaio de tensão aplicada* (freqüência nominal)

Permite verificar a isolação dos enrolamentos entre si e a terra.

- b) *Ensaio de tensão induzida* (freqüência = 400 Hz)

Permite verificar o estado da isolação entre espiras e entre seções do mesmo enrolamento. O valor da tensão induzida é o dobro da tensão nominal; sua duração de aplicação é 18 segundos e a freqüência utilizada é de 400 Hz.

- c) *Ensaio de impulso* (alta freqüência)

Procura simular, nos transformadores, as sobretensões a que estão sujeitos, quando em operação, por efeito de descargas atmosféricas, manobras etc.

68) DERIVAÇÕES

Os transformadores devem ter, no enrolamento de alta tensão, pelo menos duas derivações além da principal, para as quais se possa obter a potência nominal do enrolamento.

Esse número mínimo de derivações corresponderá:

- a) para tensões até 25 kV — as tensões não inferiores a 90% nem superiores a 105% da tensão nominal do enrolamento, correspondente à derivação principal;
- b) para tensões acima de 25 kV — as tensões não inferiores a 95% nem superiores a 105% da tensão nominal do enrolamento, correspondente à derivação principal.

Todos os transformadores devem permitir a mudança das derivações sem que seja necessário levantar-se a parte ativa dos mesmos.

Em geral, o número de derivações, incluindo a principal, varia entre três e cinco. A mudança das derivações é feita através de manípulo externo ou por meio de painel interno. O painel interno é acessível através de uma tampa de vigia.

O ajuste da tensão, em geral, é feito com transformador desligado.

A fig. 194 mostra o dispositivo de ajuste da tensão acionado por manípulo externo relativo a uma das fases do transformador.

Com o manípulo na posição 1, todo o enrolamento está sendo utilizado.

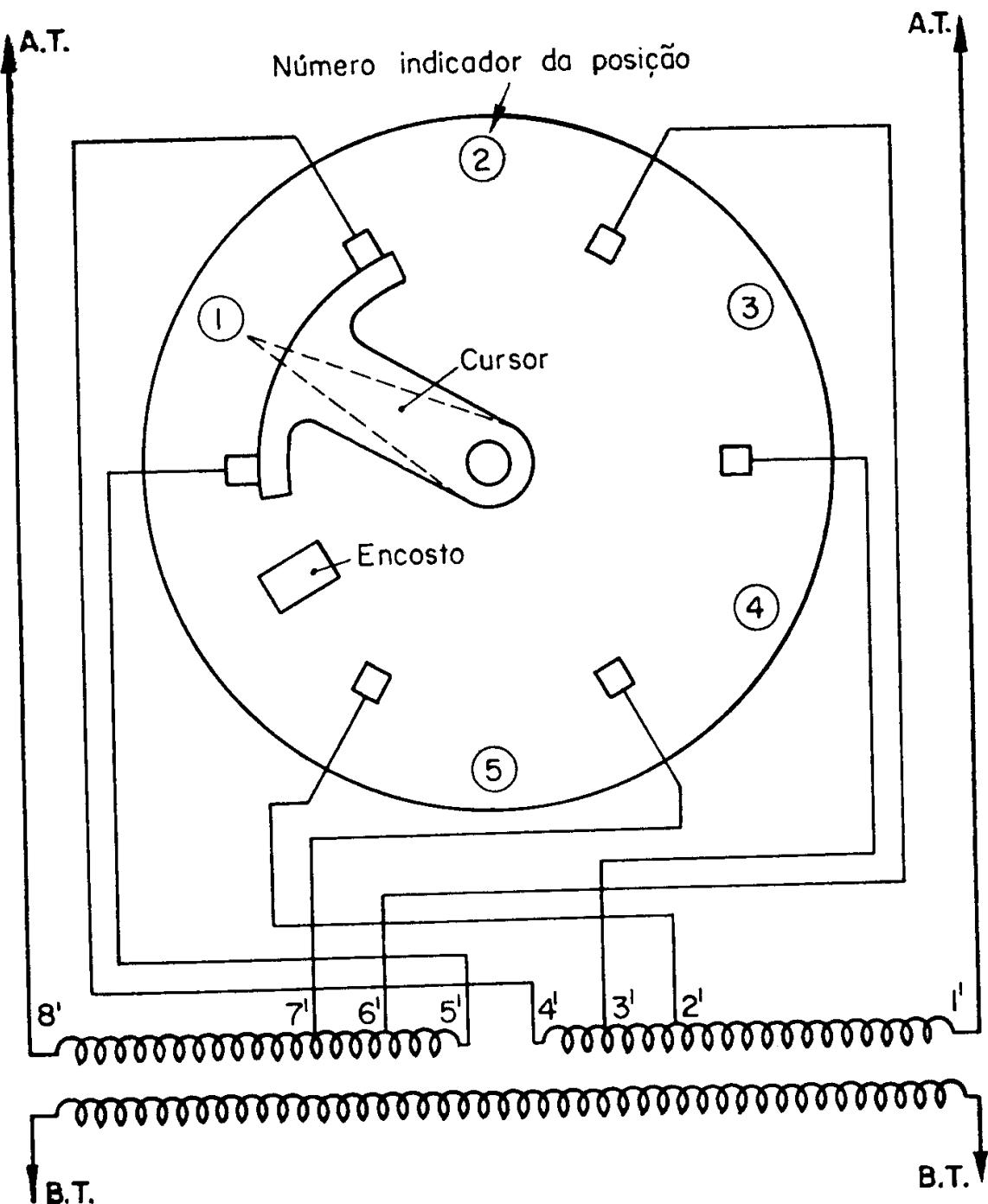


Fig. 194

Com o manípulo na posição 2, o setor compreendido entre os pontos 5' e 6' está inoperante.

Com o manípulo na posição 3, os setores compreendidos entre os pontos 3' e 6' estão inoperantes.

Com o manípulo na posição 4, os setores compreendidos entre os pontos 3' e 7' estão inoperantes.

Com o manípulo na posição 5, os setores compreendidos entre os pontos 2' e 7' estão inoperantes.

O ajuste da tensão, por meio de painel interno, é feito com dispositivo do tipo indicado nas figs. 195 (a) e (b), que permite a ligação em série ou em paralelo das duas metades do enrolamento. O esquema representa uma das fases do transformador.

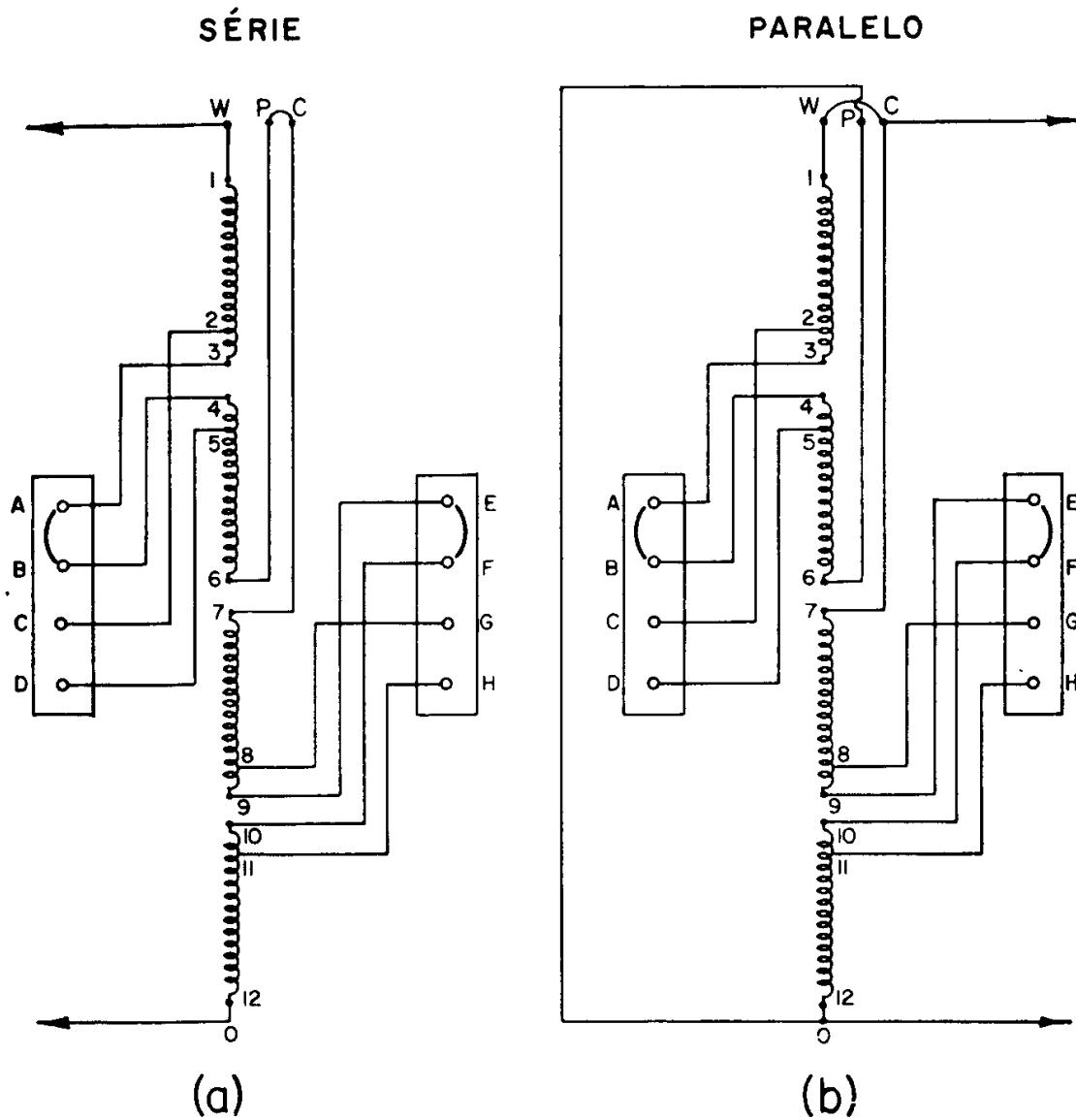


Fig. 195

Ligando os pontos *p* e *c* entre si, o enrolamento fica ligado em série, conforme fig. 195 (a). Ligando *W* com *C* e *P* com *O* as duas metades do enrolamento estão agrupadas em paralelo, conforme fig. 195 (b).

A fig. 196 mostra como efetuar a regulação da tensão com o enrolamento agrupado em série. Conectando, por meio das pontes de ligação o borne A com B e o borne E com F, conforme fig. 196 (a) todas as partes do enrolamento são atuantes e a tensão é máxima, por exemplo $V = 11\ 420$

Conectando, por meio das pontes o borne B com o C e σ F com o G, conforme fig. 196 (b) em cada metade do enrolamento fica excluído o setor marcado com X. A tensão disponível nos bornes do enrolamento é inferior à do caso anterior, isto é, $V = 10\ 900$.

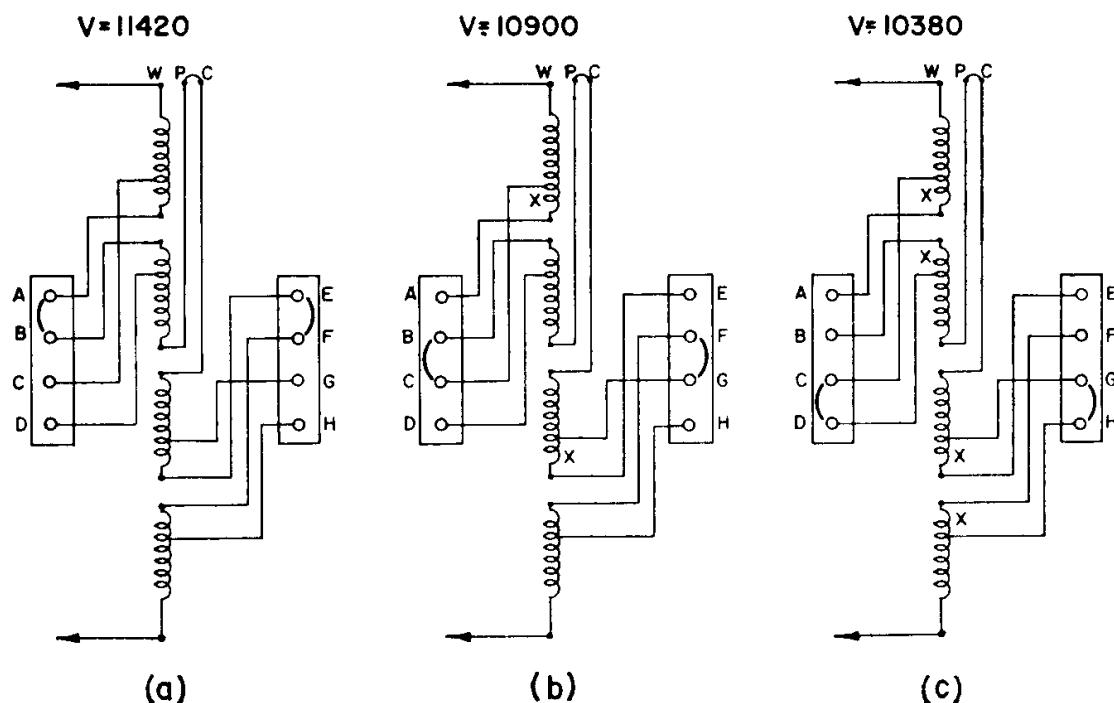


Fig. 196

Conectando, por meio das pontes o borne C com o D e o G com o H, conforme fig. 196 (c), em cada metade do enrolamento ficam excluídos os dois setores marcados com X. A tensão disponível nos bornes do enrolamento é inferior à do caso anterior, isto é, $V = 10\ 380$.

Agrupando as duas metades do enrolamento em paralelo entre si, conforme fig. 195 (b), o processo de regulação é idêntico ao descrito pelo agrupamento em série.

Para cada posição das pontes de ligação são excluídos, em cada metade do enrolamento um ou dois setores e a tensão adquire os valores indicados na tabela da fig. 197.

LIGAÇÃO EM PARALELO (Fig. 195)

Ligações das pontes	Elementos excluídos	Tensão do enrolamento
A - B e E - F	nenhum	6600 volts
B - C e F - G	2 - 3 e 8 - 9	6300 volts
C - D e G - H	2 - 3; 4 - 5 e 8 - 9; 10 - 11	6000 volts

Fig. 197

69) LÍQUIDOS ISOLANTES

O líquido de um transformador exerce duas funções distintas; uma é de natureza isolante e a outra é a de transferir para as paredes do tanque, o calor produzido, pelas perdas, na parte ativa do aparelho. A fim de executar devidamente estas funções o óleo deve possuir determinadas características entre as quais as mais importantes são: elevada rigidez dielétrica, boa fluidez e capacidade de funcionamento com temperaturas elevadas. Estas características são possuídas por dois líquidos isolantes que são: o óleo mineral e o ascarel.

O óleo mineral é obtido de óleos crus de base naftênica, cuidadosamente refinados, a fim de retirar-se todas as impurezas, os ácidos, os álcalis e o enxofre.

O ascarel chamado "Piranol" pelos americanos e "Clophen" pelos alemães, possui todas as características dos óleos minerais sem ser porém inflamável.

Os transformadores normais, que devem ser instalados em postes e em subestações onde não se precisa ter cuidados especiais, utilizam óleos minerais. Nos locais onde um princípio de incêndio poderia ter consequências catastróficas em perdas humanas e materiais, como no caso de cinemas, grandes casas comerciais, conjuntos residenciais, minas etc., é recomendável o emprego de transformadores com líquido ascarel.

O óleo mineral além de ser inflamável, apresenta o inconveniente de acumular umidade e sofrer oxidação, perdendo as suas características dielétricas. O ascarel não sofre estes inconvenientes apresentando vida útil muito longa.

As características principais dos óleos isolantes e do ascarel estão indicadas na tabela da fig. 198.

PROPRIEDADES	ÓLEO	ASCAREL
1 — Cor	Creme claro	Vermelho descorado
2 — Densidade máx. a 20°C	0,895	1,57
3 — Ponto de fulgor	130° C	—
4 — Viscosidade máx. a 20°C	23 c St.	20 c St.
5 — Acidez mg KOH/g de óleo	0,05	0,014
6 — Enxofre livre	—	—
7 — Enxofre corrosivo — cor	cidra pálido	—
8 — Fator de potência — máx. a 25°C	0,1%	—
9 — Rigidez dielétrica a 20°C	38	40
10 — Coeficiente de expansão até 100°C	0,0008	0,0007
11 — Conteúdo de água ppm máx.	30	30
12 — Tensão interfacial din/cm a 25°C	35	—

Fig. 198

70) TANQUES

O tanque do transformador, além de ser o recipiente que contém as partes ativas, isoladores, e óleo, é o elemento que transmite para o ar, o calor produzido pelas perdas.

O formato do tanque varia de redondo para os transformadores de distribuição cuja potência máxima é da ordem de 150 kVA, a oval e retangular para os transformadores de média e grande potências.

Para transformadores com potência superior a 150 kVA, os tanques são providos de rodas para transporte.

De acordo com a quantidade de calor que deve ser liberada, os transformadores têm o tanque liso, nervurado ou equipado com radiadores. Os radiadores podem ser tubulares ou em forma de câmara plana.

Os transformadores de grande potência equipados com radiadores devem ser construídos de tal forma que os mesmos possam ser desmontados a fim de tornar mais fácil o seu transporte. Os tanques providos de radiadores desmontáveis devem ser equipados com válvulas de fechamento nos pontos de fixação dos mesmos.

As figuras seguintes mostram diferentes tipos de transformadores com os radiadores mais em uso.

A fig. 199 mostra um transformador de distribuição, com tanque redondo liso, sem conservador de óleo.

A fig. 200 mostra um transformador de distribuição com tanque redondo provido de radiadores tubulares, sem conservador de óleo.

A fig. 201 mostra um transformador de distribuição com tanque retangular liso, com conservador de óleo.

A fig. 202 mostra um transformador de distribuição, com tanque retangular ondulado, com conservador de óleo.

A fig. 203 mostra um transformador de distribuição com tanque oval provido de radiadores tubulares.

A fig. 204 mostra um transformador de força com tanque provido de câmaras de resfriamento.

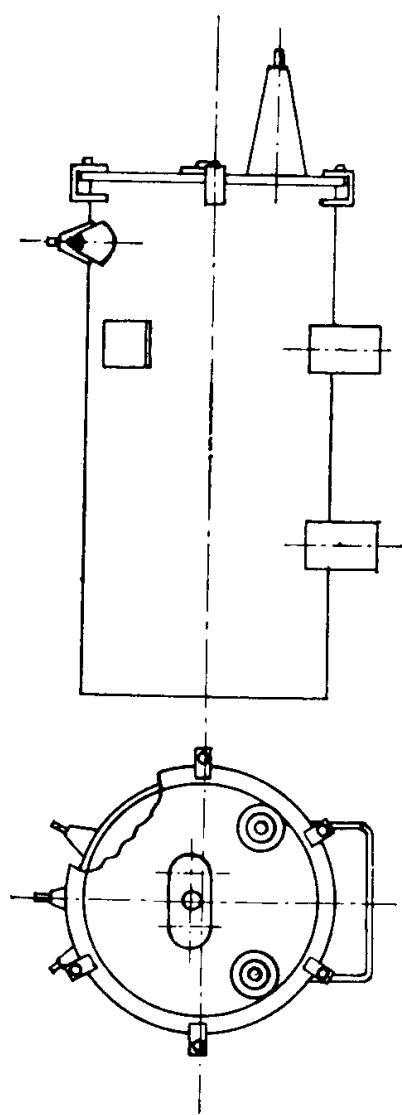


Fig. 199

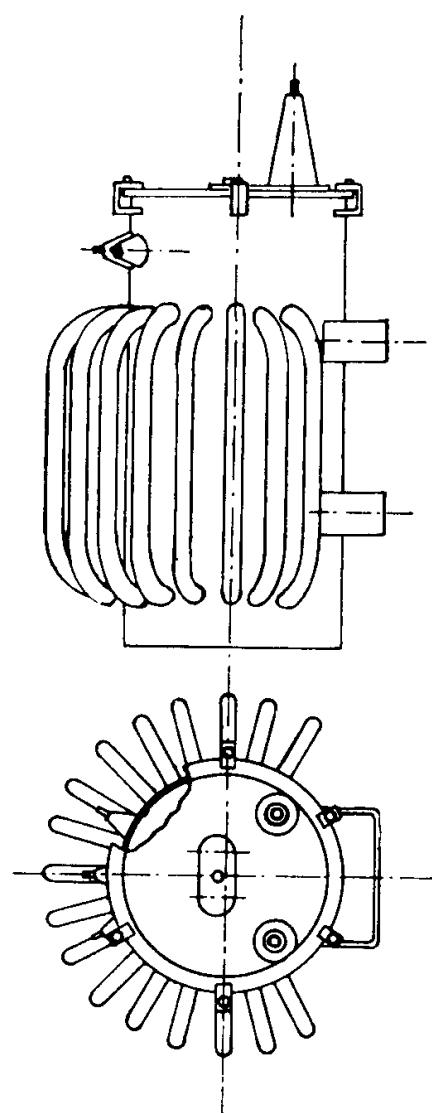


Fig. 200

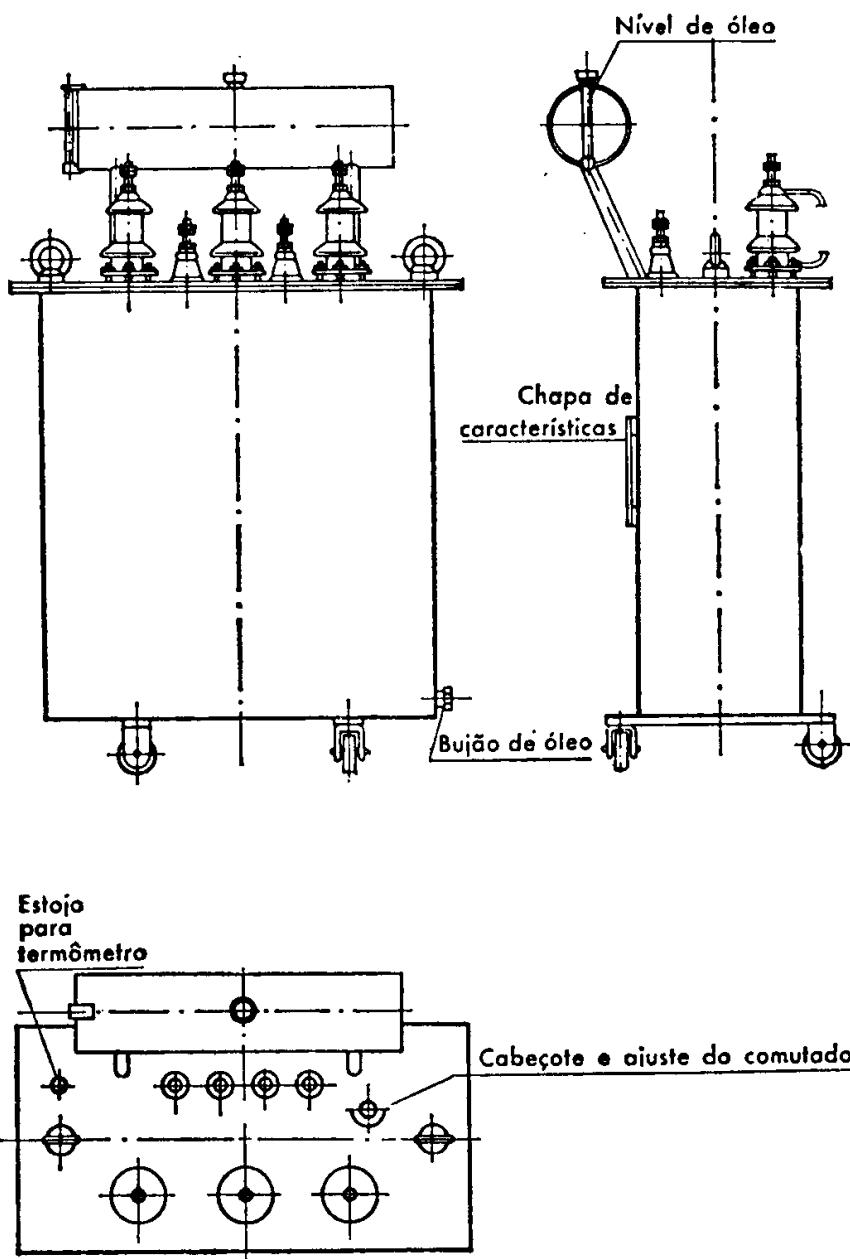


Fig. 201

Os tanques devendo suportar solicitações mecânicas consideráveis devem ser executados com chapa reforçada. A bitola das chapas para os tanques e os tubos radiadores está indicada a seguir:

Transformadores com potência até 150 kVA:

Tanque: chapa a quente de Volta Redonda, bitola 12 MSG;
espessura 2,66 mm.

Tubos radiadores: chapa com bitola 16 MSG; espessura 1,6 mm.

Transformadores com potência de 150 kVA até 500 kVA:

Paredes laterais do tanque: chapa com espessura 3/16"
 Fundo e tampa: chapa com espessura 1/4"

71) TIPOS DE RESFRIAMENTO

Os tipos de resfriamento utilizados nos transformadores são os seguintes:

a) *Transformadores secos*

- 1) SN — com resfriamento natural
- 2) SVF — com ventilação forçada

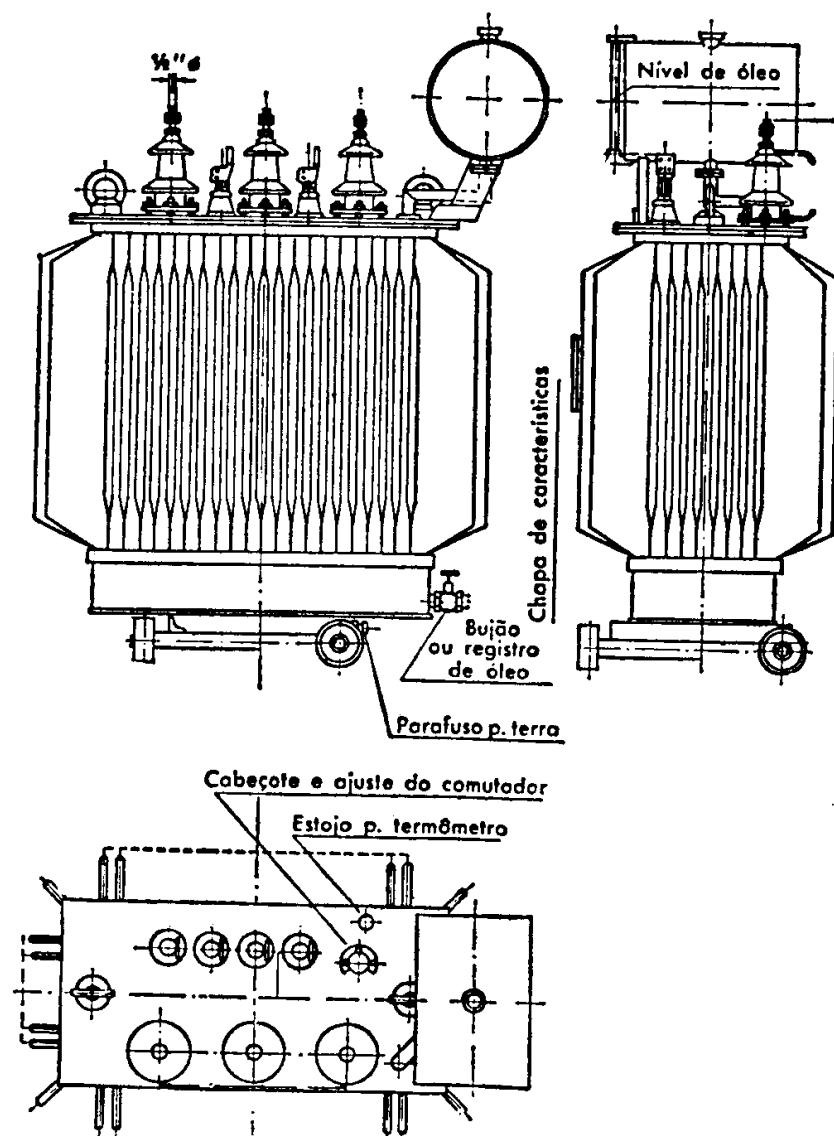


Fig. 202

b) *Transformadores em líquido isolante*

- 1) LN — resfriamento por circulação natural do líquido isolante.
- 2) LCF — resfriamento por circulação forçada de óleo, que é retirado do tanque e bombeado num cambiador de calor óleo-ar externo.
- 3) LCF/ACF — resfriamento por circulação forçada do óleo do tanque para um cambiador de calor óleo-água, externo, em que esta circula em regime forçado.
- 4) LN — VF — Resfriamento por circulação natural do óleo e ventilação forçada sobre o tanque e radiadores.

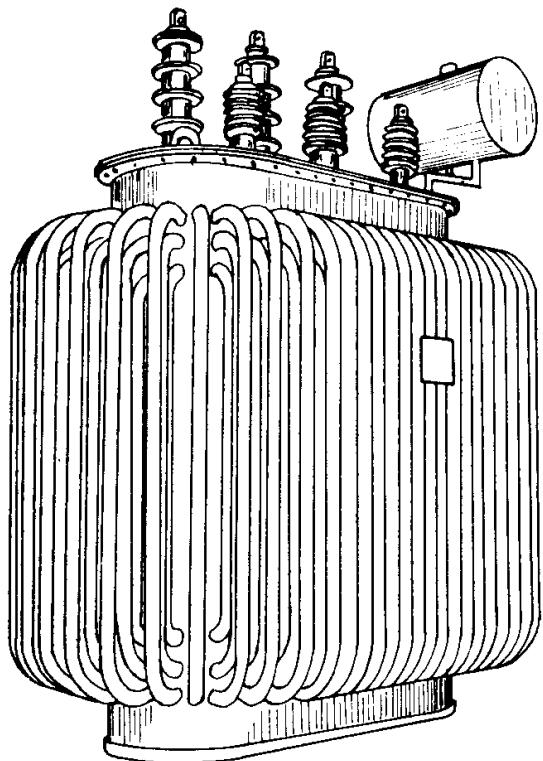


Fig. 203

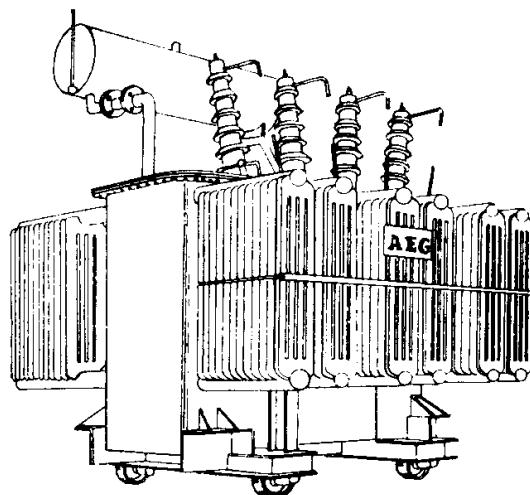


Fig. 204

72) AUMENTO DA POTÊNCIA NOMINAL POR MEIO DA VENTILAÇÃO FORÇADA

A adoção da ventilação forçada sobre os tanques e os radiadores permite obter-se um aumento da potência nominal dos transformadores com resfriamento natural, de acordo com a tabela da fig. 205.

TIPO DE RESFRIAMENTO	POTÊNCIA COM RESFRIAMENTO NATURAL EM kVA		AUMENTO DA POTÊNCIA COM RESFRIAMENTO FORÇADO
	MONOFÁSICO	TRIFÁSICO	
LN - VF	até 2500	até 2500	15%
LN - VF	2500/8333	2500/10 000	25%
LN - VF	8333 e mais	12 000/ e mais	30%

Fig. 205

Por exemplo, um transformador trifásico com resfriamento por circulação natural do líquido, cuja potência nominal é 5000 kVA, utilizando-se a ventilação forçada sobre os radiadores pode fornecer a potência de $5000 \cdot 1,25 = 6250$ kVA.

73) CONSERVADOR DE LÍQUIDO

Os tanques cheios parcialmente de líquido, não possuem o conservador de líquido, pois a câmara de ar existente no interior do transformador permite que os mesmos se expandam quando aquecidos.

Os transformadores que têm o tanque totalmente cheio de líquido, devem ter o conservador a fim de permitir a expansão do líquido quando este se aquece.

O conservador de líquido destina-se também a evitar o contato direto entre o ar de entrada e o líquido, o que reduz consideravelmente a penetração no tanque da água proveniente da condensação da umidade do ar. A água como foi anteriormente observado será prejudicial se o meio líquido for óleo mineral.

Nos transformadores com óleo, para evitar que a umidade do ar proveniente do exterior penetre no meio líquido, coloca-se no respiradouro do conservador uma cápsula contendo silicagel.

Na passagem do ar, os cristais de silicagel absorvem a umidade contida na mesma, permitindo um prolongado e perfeito funcionamento do transformador.

Se o ar for muito úmido será aconselhável a substituição periódica da cápsula de silicagel. A cápsula deverá ser substituída quando a cor dos cristais variar do azul para o vermelho. A cápsula usada pode ser reativada colocando-a numa estufa por umas horas de forma que a umidade possa ser retirada dos cristais.

74) TRANSFORMADOR OPERANDO COM FREQUÊNCIA DIFERENTE DA NOMINAL

No Brasil não é raro o caso de um transformador fabricado para 50 Hz ter de operar com 60 Hz e vice-versa. Quando isso ocorre ficam afetados os seguintes valores:

- Perda no ferro
- Corrente de excitação
- Impedância
- Regulação
- Rendimento
- Aquecimento.

a) *Perdas no ferro*

Variam na proporção inversa da freqüência, podendo ser aproximadamente avaliadas por :

$$\frac{Wf_1}{Wf_2} = \frac{f_2}{f_1}$$

b) *Perdas no cobre*

Ficam invariáveis ao mudar da freqüência.

c) *Impedância*

Variando a freqüência não varia a resistência ôhmica dos enrolamentos. A reatânciia entretanto varia com a freqüência. Assim sendo, a impedância, embora não proporcionalmente, diminuirá ao diminuir a freqüência.

d) *Corrente de excitação*

A corrente de excitação depende do valor da indução existente no núcleo. Assim sendo, aumentará ao diminuir a freqüência e vice-versa. A experiência comprova que um transformador fabricado para 60 Hz quando alimentado com a freqüência de 50 Hz, absorve a corrente $I_{t2} = 2,5 \cdot I_{t1}$.

e) *Elevação da temperatura*

Diminuindo a freqüência aumentam as perdas no ferro e portanto as perdas totais. Assim sendo, o aquecimento do transformador aumenta também.

f) *Resumo*

A fim de ter-se uma idéia de como variam as grandezas características de um transformador, quando alimentado por uma freqüência diferente da nominal, pode-se observar o diagrama da fig. 206.

	Perdas no Ferro	Perdas Totais	Corrente de Excitação	Impedância	Regulação	Elevação de Temperatura
Transformador de 60 Hz operando a 50 Hz	aumentam ~ 18%	aumentam ~ 5%	aumenta ~ 250%	diminui ~ 14%	diminui ~ 14%	aumenta ~ 5%
Transformador de 50 Hz operando a 60 Hz	diminuem ~ 13%	diminuem ~ 4%	diminui ~ 40%	aumenta ~ 10%	aumenta ~ 10%	diminui ~ 4%

Fig. 206

75) TRANSFORMADORES QUE OPERAM A ALTITUDES SUPERIORES A 1000 METROS

Em altitudes acima de 1000 metros, a diminuição da densidade do ar prejudica o resfriamento dos transformadores, e para evitar que estes aqueçam além dos limites previstos na tabela da fig. 151, é preciso sua potência nominal sofrer redução de acordo com a equação seguinte:

$$W_{nr} = W_n \left(1 - K \frac{H - 1000}{100} \right)$$

sendo:

W_{nr} : potência nominal reduzida em kVA.

W_n : potência nominal em kVA.

H: altitude em metros (arredondada sempre para a centena de metros seguinte).

K: fator de redução de acordo com a tabela da fig. 207.

**REDUÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL
PARA ALTITUDES SUPERIORES A
1000 m**

Tipo de resfriamento	K
SECO	
a) com resfriamento natural (SN)	0,003
b) com ventilação forçada (SVF)	0,005
EM LÍQUIDO ISOLANTE	
c) natural (LN)	0,004
d) forçado em cambiador óleo-ar (LCF)	0,005
e) forçado em cambiador óleo-água (LCF-ACF)	0,000
f) natural com ventilação forçada (LN-SVF)	0,005

Fig. 207

CORREÇÃO DA RIGIDEZ DIELÉTRICA DO AR PARA ALTITUDES ACIMA DE 1000 m

Altitude (m)	Fator de correção
1000	1,00
1200	0,98
1500	0,95
1800	0,92
2100	0,89
2400	0,86
2700	0,83
3000	0,80
3600	0,75
4200	0,70
4500	0,67

Fig. 208

Por exemplo, um transformador de 5000 kVA, com resfriamento natural, instalado a uma altitude de 3500 metros, a fim de não superar os limites de aquecimento previstos pelas normas, deverá fornecer a potência reduzida obtida por:

$$W_{nr} = W_n \left(1 - K \frac{H - 1000}{100} \right) = 5000 \left(1 - 0,004 \frac{3500 - 1000}{100} \right) = 4500 \text{ kVA}$$

Os transformadores projetados para altitudes até 1000 metros podem ser instalados em altitudes maiores desde que a isolação assegure a classe de tensão de isolamento nominal do transformador, tendo em conta a redução da rigidez dielétrica do ar com o aumentar da altitude.

A determinação da rigidez dielétrica do ar, nas diferentes altitudes, é feita usando-se os fatores de correção indicados na tabela da fig. 208.

CAPÍTULO VIII

CONSIDERAÇÕES E DADOS PARA O PROJETO DOS TRANSFORMADORES DE GRANDE POTÊNCIA

76) ISOLAMENTO DOS CONDUTORES

Os condutores utilizados na construção dos transformadores são isolados com esmalte (tipo Formex), algodão ou papel.

Para fios redondos, em geral, deve-se considerar o aumento de espessura, devido ao isolamento, aproximadamente de:

- Isolamento com esmalte; acréscimo = 0,15 mm
- Cada camada de algodão ou de papel; acréscimo = 0,1 mm.

O isolamento entre uma camada e a sucessiva é feito com papel cuja espessura é de 0,1 mm.

Nos transformadores com tensões nominais superiores a 6000 volts, os enrolamentos de A.T. são executados com bobinas em forma de discos. A fim de garantir maior segurança, as bobinas externas devem possuir isolamento reforçado. O aumento de espessura dos condutores devido ao isolamento depende da tensão nominal resultando:

Para tensões até 15 000 volts; acréscimo = 0,6 mm.

Para tensões entre 15 000 e 20 000 volts; acréscimo = 0,8 mm.

Para tensões entre 20 000 e 30 000 volts; acréscimo = 1,2 mm.

Nas bobinas externas o isolamento entre camadas é feito com duas folhas de papel cuja espessura é de 0,1 mm.

Para condutores com seção superior a 4 mm^2 , emprega-se barra de cobre de área quadrada ou retangular. O acréscimo de espessura da barra, devido ao isolamento de algodão, varia de 0,4 mm para condutores com seção até 20 mm^2 , a 1 mm para condutores de seção igual ou maior a 80 mm^2 . Para estes condutores deve ser prevista uma folga que varie respectivamente entre 0,1 e 0,2 mm.

Nos transformadores com bobinas concêntricas, o enrolamento B.T. é colocado internamente, próximo ao núcleo, sendo isolado deste último por meio de um tubo de papelão com a espessura mínima de 2 mm.

A espessura em milímetros deste tubo é calculada dividindo-se por 10 o valor da tensão em kV, usada nos ensaios, em correspondência da

tensão B.T., com freqüência industrial, cujos valores estão indicados na tabela da fig. 193. Assim sendo, referindo-se à fig. 209

$$t_1 = \frac{\text{kV (Ensaios B.T.)}}{10} \text{ expressa em milímetros.}$$

A fim de obter-se boa resistência mecânica e eficiente refrigeração, o enrolamento B.T. é executado preferivelmente numa só camada. Quando o enrolamento B.T. for executado em várias camadas, o isolamento entre uma camada e a outra é feito com prespann cuja espessura varia entre 0,3 e 0,5 mm.

O enrolamento A.T. é subdividido em bobinas, conforme foi visto no parágrafo 8. A tensão em cada bobina não deve superar os 1000 volts.

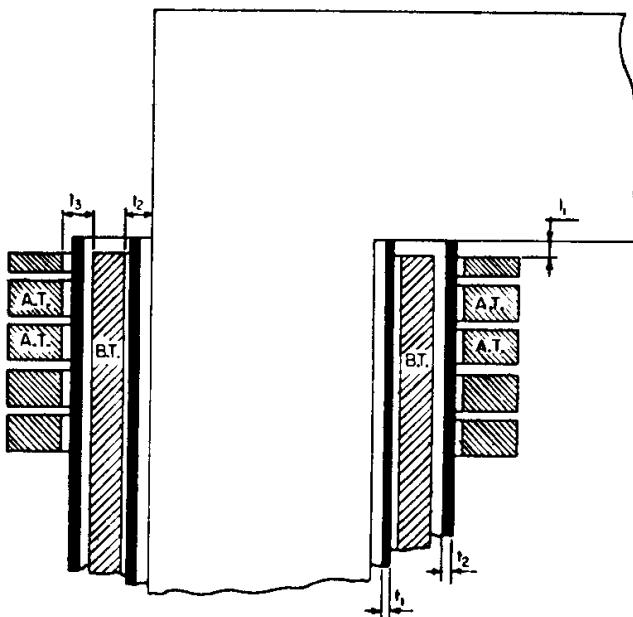


Fig. 209

Entre o enrolamento B.T. e o A.T. coloca-se um tubo de papelão, cuja espessura em milímetros é calculada dividindo-se por 10 o valor da tensão em kV, usada nos ensaios do circuito A.T., com freqüência industrial, cujos valores estão indicados na tabela da fig. 193.

Assim sendo, referindo-se à fig. 209

$$t_2 = \frac{\text{kV (Ensaios A.T.)}}{10} \text{ expressa em milímetros.}$$

Nos transformadores resfriados com óleo, a distância mínima l_1 , que deve separar os enrolamentos e o núcleo, na cabeça das bobinas, é obtida, expressa em milímetros, multiplicando-se por 1,3 o valor da classe de tensão do circuito A.T.; assim sendo:

$$l_1 = 1,3 \text{ kV expressa em milímetros.}$$

A distância entre o enrolamento A.T. e o B.T. é calculada pela fórmula:

$$l_3 = 0,6 \text{ kV expressa em milímetros.}$$

A distância entre o enrolamento B.T. e o núcleo varia entre 15 e 20 mm.

Nos transformadores resfriados com ar, até 30 kV, a distância entre o enrolamento A.T. e o B.T. é dada por:

$$l_3 = 2 \text{ kV expressa em milímetros.}$$

77) SUBDIVISÃO DAS PERDAS ENTRE FERRO E COBRE

Teoricamente, o máximo rendimento de um transformador verifica-se quando as perdas no ferro W_{Fe} são iguais às perdas totais no cobre W_{cu} e as perdas no primário são iguais às do secundário.

Apresentando, entretanto, a curva do rendimento, em função da relação W_{cu}/W_{Fe} , uma forma aplanaada, é possível afastar-se da relação ideal $W_{cu}/W_{Fe} = 1$ sem que o rendimento fique sensivelmente afetado.

Diferentes fatores influem na escolha da relação W_{cu}/W_{Fe} sendo um destes o custo do ferro e do cobre. Um transformador que trabalha muitas horas a vazio ou com carga reduzida, deve ter perdas no ferro de valor baixo.

As figs. 210 até 221 mostram como variam as perdas no cobre e no ferro dos transformadores de construção padronizada, para a freqüência de 50 e a de 60 Hz, para os diferentes tipos de ligações, e classes de tensão.

As figuras acima mencionadas apresentam também os valores do rendimento e da regulação com fator de potência 1 e 0,8, apresentando também os valores da impedância e em alguns casos o peso da parte ativa do transformador ($P_{Fe} + P_{cu}$).

**TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EM ÓLEO, DE DISTRIBUIÇÃO,
SEM CONSERVADOR DE LÍQUIDO; FREQUÊNCIA 60 Hz;
CLASSE DE TENSÃO: 15 kV.**

POTÊNCIA kVA	PERDAS W		PERDAS W		IMPE- DÂNCIA %	EXCITAÇÃO %		
	Classe Tensão 15 kV		Classe Tensão 5 kV					
	Ferro	Cobre	Ferro	Cobre				
10	70	225	70	225	2,5	2,5		
15	110	290	95	305	2,5	2,5		
25	130	420	112	438	2,5	2,0		
37,5	160	590	156	564	2,5	2,0		
50	200	775	190	710	2,5	2,0		
75	270	1030	255	975	2,5	1,5		
100	320	1280	300	1270	2,5	1,5		

Fig. 210

**TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EM ÓLEO DE DISTRIBUIÇÃO –
RURAIS – CLASSE DE TENSÃO: 15 kV; FREQUÊNCIA: 50 e 60 Hz**

POTÊNCIA kVA	PERDAS W FREQUÊNCIA 60 Hz		PERDAS W FREQUÊNCIA 50 Hz		IMPEDÂNCIA %		EXCITAÇÃO %	
	Ferro	Cobre	Ferro	Cobre	F = 60 Hz	F = 50 Hz	F = 60 Hz	F = 50 Hz
5	63	135	53	156	2,5	3,0	3,7	3,5
10	85	249	78	307	2,5	3,0	3,5	3,5
15	114	315	104	358	2,5	3,0	2,9	2,9
25	154	473	136	524	2,5	3,0	2,5	2,5
37,5	198	671	176	731	2,5	3,0	2,5	2,5

Fig. 211

**TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EM ÓLEO, DE DISTRIBUIÇÃO —
RURAIS — CLASSE DE TENSÃO: 25 kV; FREQUÊNCIA: 50 Hz**

POTÊNCIA kVA	PERDAS W		IMPEDÂNCIA %	EXCITAÇÃO %
	Ferro	Cobre		
5	63	157	3,0	3,5
10	88	297	3,0	3,5
15	115	369	3,0	3,5
25	143	550	3,0	2,5
37,5	198	759	3,0	2,5
50	247	897	3,0	2,5

Fig. 212

**TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS SECOS DE DISTRIBUIÇÃO;
CLASSE DE TENSÃO: 1,2 kV; FREQUÊNCIA: 50 Hz**

POTÊNCIA kVA	PERDAS W		IMPEDÂNCIA %
	Ferro	Cobre	
5	82	195	4,95
7,5	87	263	4,70
10	91	327	4,70
15	141	459	3,80
25	237	608	3,0
37,5	435	755	2,5

Fig. 213

**TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM ÓLEO COM CONSERVADOR DE
LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR —
CLASSES DE TENSÃO: 5; 8,7 ou 15 kV
PRIMÁRIO ATÉ 15 000 V EM ESTRELA; SECUNDÁRIO EM ZIGUEZAGUE**

FREQÜÊNCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos \phi = 1$	$\cos \phi = 0,8$	$\cos \phi = 1$	$\cos \phi = 0,8$	
60	10	220 a 440	140	230	96,43	95,57	2,30	3,42	3,5
	15	220 a 440	150	400	96,46	95,62	2,66	3,50	3,5
	30	220 a 440	200	650	97,25	96,57	2,17	3,38	3,5
	45	220 a 440	320	820	97,53	96,93	1,82	3,24	3,5
	75	220 a 440	410	1400	97,65	97,06	1,87	3,27	3,5
	112,5	220 a 440	620	1800	97,89	97,38	1,60	3,15	3,5
	150	220 a 440	800	2300	97,97	97,48	1,53	3,11	3,5
	225	220	950	3500	98,06	97,59	1,64	3,81	4,5
		380 ou 440	3350	98,12	97,67	1,58	3,77	4,5	
	300	220	1100	4700	98,10	97,64	1,66	3,80	4,5
		380 ou 440	4300	98,21	97,78	1,54	3,74	4,5	
50	500	220	1700	7800	98,13	97,68	1,65	3,80	4,5
		380 ou 440	7400	98,21	97,78	1,57	3,77	4,5	
	10	220 a 440	130	270	96,15	95,24	2,70	3,49	3,5
	15	220 a 440	140	460	96,15	95,24	3,07	3,46	3,5
	30	220 a 440	190	760	96,93	96,19	2,53	3,47	3,5
	45	220 a 440	300	960	97,28	96,61	2,13	3,36	3,5
	75	220 a 440	380	1650	97,37	96,73	2,20	3,39	3,5
	112,5	220 a 440	580	2100	97,67	97,11	1,87	3,26	3,5
	150	220 a 440	750	2700	97,75	97,20	1,80	3,24	3,5
	225	220	950	4000	97,84	97,32	1,87	3,92	4,5
		380 ou 440	3850	97,91	97,40	1,80	3,89	4,5	
	300	220	1100	5400	97,88	97,36	1,88	3,92	4,5
		380 ou 440	5000	98,01	97,52	1,75	3,86	4,5	
	500	220	1700	9000	97,90	97,39	1,88	3,92	4,5
		380 ou 440	8500	98,00	97,51	1,79	3,88	4,5	

Fig. 214

**TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM ÓLEO COM CONSERVADOR DE
LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR —
CLASSES DE TENSÃO: 5; 8,7 ou 15 kV.**

**PRIMÁRIO ATÉ 15 000 V EM ESTRELA OU TRIÂNGULO; SECUNDÁRIO
EM ESTRELA.**

FREQÜÊNCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	
60	15	220 a 440	170	300	96,96	96,24	2,00	3,32	3,5
		220 a 440	210	570	97,47	96,85	1,90	3,29	3,5
		220 a 440	330	750	96,65	97,09	1,67	3,19	3,5
		220 a 440	450	1200	97,85	97,32	1,60	3,15	3,5
		220 a 440	650	1650	98,00	97,51	1,47	3,09	3,5
		220 a 440	800	2050	98,13	97,68	1,37	3,02	3,5
	225	220	2950	98,29	97,88	1,40	3,67	4,5	
		380 ou 440	950	2800	98,36	97,96	1,34	3,63	4,5
	300	220	3900	98,36	97,96	1,39	3,66	4,5	
		380 ou 440	1100	3700	98,42	98,04	1,32	3,61	4,5
		220	6400	98,41	98,02	1,37	3,65	4,5	
	500	380 ou 440	1700	6000	98,48	98,11	1,29	3,60	4,5
		220	10 000	98,42	98,04	1,47	4,32	5,5	
		380 ou 440	2000	8500	98,62	98,28	1,28	4,20	5,5
	750	2200 a 6900		7000	98,81	98,52	1,08	4,07	5,5
		220	12 500	98,47	98,10	1,39	4,27	5,5	
		380 ou 440	3000	11 000	96,62	98,28	1,24	4,19	5,5
	1000	2200 a 6900		8800	98,82	98,55	1,03	4,03	5,5
		220	18 000	98,55	98,20	1,34	4,24	5,5	
		380 ou 440	4000	16 000	98,68	98,36	1,21	4,16	5,5
	1500	2200 a 6900		12 500	98,91	98,64	0,98	4,00	5,5
		220	18 000	98,55	98,20	1,34	4,24	5,5	

Segue na Página Seguinte

**TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM ÓLEO COM CONSERVADOR DE
LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR —
CLASSES DE TENSÃO: 5; 8,7 ou 15 kV.
PRIMÁRIO ATÉ 15 000 V EM ESTRELA OU TRIÂNGULO; SECUNDÁRIO
EM ESTRELA.**

FREQÜÊNCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	
50	15	220 a 440	160	350	96,71	95,92	2,33	3,43	3,5
	30	220 a 440	200	670	97,18	96,49	2,23	3,40	3,5
	45	220 a 440	300	880	97,45	96,83	1,95	3,30	3,5
	75	220 a 440	420	1400	97,63	97,05	1,87	3,27	3,5
	112,5	220 a 440	600	1950	97,78	97,24	1,73	3,21	3,5
	150	220 a 440	750	2400	97,94	97,44	1,60	3,13	3,5
	225	220		3450	98,08	97,61	1,62	3,80	4,5
		380 ou 440	950	3250	98,17	97,72	1,53	3,75	4,5
	300	220		4550	98,15	97,70	1,61	3,78	4,5
		380 ou 440	1100	4300	98,23	97,80	1,52	3,73	4,5
	500	220		7500	98,19	97,75	1,59	3,79	4,5
		380 ou 440	1700	7000	98,28	97,87	1,49	3,71	4,5
	750	220		11 500	98,23	97,80	1,67	4,44	5,5
		380 ou 440	2000	9800	98,45	98,07	1,45	3,54	5,5
		2200 a 6900		8000	98,68	98,36	1,21	4,16	5,5
	1000	220		14 500	98,28	97,86	1,59	4,41	5,5
		380 ou 440	3000	12 500	98,47	98,10	1,39	4,27	5,5
		2200 a 6900		10 000	98,72	98,40	1,15	4,11	5,5
	1500	220		20 500	98,39	98,00	1,51	4,35	5,5
		380 ou 440	4000	18 500	98,52	98,16	1,38	4,26	5,5
		2200 a 6900		14 500	98,78	98,48	1,11	4,09	5,5

Fig. 215

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM ÓLEO COM CONSERVADOR DE LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR — CLASSE DE TENSÃO: 25 kV; PRIMÁRIO EM ESTRELA; SECUNDÁRIO: ATÉ 150 kVA EM ZIGUEZAGUE; ACIMA DE 225 kVA EM ESTRELA.

FREQÜENCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	
	30	Z-220 a 440	230	680	97,06	96,35	2,32	3,81	4,0
	45	Z-220 a 440	350	850	97,40	96,77	1,95	3,62	4,0
	75	Z-220 a 440	450	1400	97,59	97,00	1,93	3,61	4,0
	112,5	Z-220 a 440	650	1900	97,79	97,26	1,76	3,52	4,0
	150	Z-220 a 440	850	2400	97,88	97,36	1,67	3,48	4,0
	225	Y-220	950	3000	98,28	97,85	1,42	3,68	4,5
		Y-380 ou 440	2850	98,34	97,93	1,36	3,64	4,5	
	300	Y-220	4000	98,33	97,92	1,42	3,68	4,5	
		Y-380 ou 440	1100	3800	98,39	98,00	1,36	3,64	4,5
	60	Y-220	6400	98,41	98,02	1,37	3,65	4,5	
	500	Y-380 ou 440	1700	6000	98,48	98,11	1,29	3,60	4,5
		Y-220	10 000	98,42	98,04	1,47	4,32	5,5	
	750	Y-380 ou 440	2000	8500	98,62	98,28	1,28	4,20	5,5
		Y-2200 a 6900		7000	98,81	98,52	1,08	4,07	5,5
	1000	Y-220	12 500	98,47	98,10	1,39	4,27	5,5	
		Y-380 ou 440	3000	11 000	98,62	98,28	1,24	4,19	5,5
		Y-2200 a 6900		8800	98,62	98,55	1,03	4,03	5,5
	1500	Y-220	18 000	98,55	98,20	1,34	4,24	5,5	
		Y-380 ou 440	4000	16 000	98,68	98,36	1,21	4,16	5,5
		Y-2200 a 6900		12 500	98,91	98,64	0,98	4,00	5,5

Segue na Página Seguinte

**TRANSFORMADORES TRIFASICOS EM ÓLEO COM CONSERVADOR DE
LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR – CLASSE DE
TENSÃO: 25 kV; PRIMÁRIO EM ESTRELA; SECUNDÁRIO: ATÉ 150 kVA
EM ZIGUEZAGUE; ACIMA DE 225 kVA EM ESTRELA**

FREQÜENCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	
50	30	Z-220 a 440	200	800	96,67	95,84	2,71	3,92	4,0
	45	Z-220 a 440	320	1000	97,14	96,46	2,28	3,78	4,0
	75	Z-220 a 440	420	1650	97,31	96,70	2,26	3,76	4,0
	112,5	Z-220 a 440	600	2200	97,58	96,98	2,01	3,65	4,0
	150	Z-220 a 440	800	2700	97,72	97,16	1,86	3,58	4,0
	225	Y-220	950	3550	98,04	97,56	1,67	3,82	4,5
		Y-380 ou 440		3350	98,12	97,67	1,58	3,76	4,5
	300	Y-220	1100	4650	98,12	97,65	1,64	3,81	4,5
		Y-380 ou 440		4400	98,20	97,76	1,56	3,77	4,5
	500	Y-220	1700	7500	98,19	97,75	1,59	3,79	4,5
		Y-380 ou 440		7000	98,28	97,87	1,49	3,71	4,5
	750	Y-220	2000	11 500	98,23	97,80	1,67	4,44	5,5
		Y-380 ou 440		9800	98,45	98,07	1,45	3,54	5,5
	1000	Y-2200 a 6900	3000	8000	98,68	98,36	1,21	4,16	5,5
		Y-220		14 500	98,28	97,86	1,59	4,41	5,5
	1500	Y-380 ou 440	4000	12 500	98,47	98,10	1,39	4,27	5,5
		Y-2200 a 6900		10 000	98,72	98,40	1,15	4,11	5,5
		Y-220		20 500	98,39	98,00	1,51	4,35	5,5
		Y-380 ou 440		18 500	98,52	98,16	1,38	4,26	5,5
		Y-2200 a 6900		14 500	98,78	98,48	1,11	4,09	5,5

Fig. 216

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM ÓLEO COM CONSERVADOR DE
LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR — CLASSE DE
TENSÃO: 25 kV; PRIMÁRIO ATÉ 25 000 V EM TRIÂNGULO; SECUNDÁRIO
EM ESTRELA.

FREQUÊNCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	
60	30	220 a 440	260	600	97,22	96,54	2,04	3,33	3,5
	45	220 a 440	380	800	97,45	96,83	1,83	3,25	
	75	220 a 440	500	1250	97,72	97,16	1,72	3,20	
	112,5	220 a 440	700	1750	97,87	97,35	1,61	3,14	
	150	220 a 440	900	2200	97,98	97,48	1,52	3,03	
	225	220	1000	3000	98,25	97,83	1,42	3,68	4,5
		380 ou 440		2850	98,32	97,90	1,36	3,64	4,5
	300	220	1150	4000	98,31	97,90	1,42	3,68	4,5
		380 ou 440		3800	98,38	97,98	1,36	3,64	4,5
	500	220	1700	6400	98,41	98,02	1,37	3,65	4,5
		380 ou 440		6000	98,48	98,11	1,29	3,60	4,5
	750	220	2000	10 000	98,42	98,04	1,47	4,32	5,5
		380 ou 440		8500	98,62	98,28	1,28	4,20	5,5
	1000	2200 a 6900	3600	7000	98,81	98,52	1,08	4,07	5,5
		220		12 500	98,47	98,10	1,39	4,27	5,5
	1500	380 ou 440	4000	11 000	98,62	98,28	1,24	4,19	5,5
		2200 a 6900		8800	98,82	98,55	1,03	4,03	5,5
	1500	220	18 000	18 000	98,55	98,20	1,34	4,24	5,5
		380 ou 440		16 000	98,68	98,36	1,21	4,16	5,5
		2200 a 6900		12 500	98,91	98,64	0,98	4,00	5,5

Segue na Página Seguinte

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM ÓLEO COM CONSERVADOR DE
LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR – CLASSE DE
TENSÃO: 25 kV; PRIMÁRIO ATÉ 25 000 V EM TRIÂNGULO; SECUNDÁRIO
EM ESTRELA.

FREQÜENCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos \phi = 1$	$\cos \phi = 0,8$	$\cos \phi = 1$	$\cos \phi = 0,8$	
50	30	220 a 440	230	700	96,99	96,27	2,36	3,43	3,5
	45	220 a 440	350	900	97,30	96,64	2,04	3,33	3,5
	75	220 a 440	450	1450	97,53	96,93	1,97	3,30	3,5
	112,5	220 a 440	650	2050	97,67	97,08	1,87	3,26	3,5
	150	220 a 440	850	2550	97,78	97,24	1,75	3,20	3,5
	225	220	1000	3550	98,02	97,53	1,67	3,82	4,5
		380 ou 440		3350	98,10	97,58	1,58	3,76	4,5
	300	220	1150	4650	98,11	97,64	1,64	3,81	4,5
		380 ou 440		4400	98,18	97,74	1,56	3,77	4,5
	500	220	1700	7500	98,19	97,75	1,59	3,79	4,5
		380 ou 440		7000	98,28	97,87	1,49	3,71	4,5
	750	220	2000	11 500	98,23	97,80	1,67	4,44	5,5
		380 ou 440		9800	98,45	98,07	1,45	3,54	5,5
	1000	2200 a 6900	3000	8000	98,68	98,36	1,21	4,16	5,5
		220		14 500	98,28	97,86	1,59	4,41	5,5
	1500	380 ou 440	4000	12 500	98,47	98,10	1,39	4,27	5,5
		2200 a 6900		10 000	98,72	98,40	1,15	4,11	5,5
	2200 a 6900	220	20 500	98,39	98,00	1,51	4,35	5,5	
		380 ou 440		18 500	98,52	98,16	1,38	4,26	5,5
		2200 a 6900		14 500	98,78	98,48	1,11	4,09	5,5

Fig. 217.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM ÓLEO SEM CONSERVADOR DE LÍQUIDO PARA INSTALAÇÃO INTERIOR E EXTERIOR — CLASSE DE TENSÃO: 15 kV; PRIMÁRIO EM TRIÂNGULO OU ESTRELA; SECUNDÁRIO EM ESTRELA.

FREQUÊNCIA Hz	POTÊNCIA kVA	TENSÃO SECUNDÁRIA V	PERDAS W		RENDIMENTO %		REGULAÇÃO %		IMPEDÂNCIA a 75°C %
			Ferro	Cobre	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	$\cos\phi = 1$	$\cos\phi = 0,8$	
60	15	220 ou 380	150	300	97,09	96,39	2,04	3,52	3,5
	30	220 ou 380	200	630	97,31	96,66	2,16	3,73	4,0
	45	220 ou 380	300	800	97,61	97,04	1,84	3,59	4,0
	75	220 ou 380	400	1250	97,85	97,32	1,74	3,53	4,0
	112,5	220 ou 380	550	1700	98,04	97,56	1,58	3,45	4,0
50	15	220 ou 380	150	350	96,77	96,00	2,36	3,42	3,5
	30	220 ou 380	200	740	96,96	96,24	2,52	3,87	4,0
	45	220 ou 380	300	930	97,34	96,70	2,12	3,71	4,0
	75	220 ou 380	400	1450	97,59	97,00	1,99	3,66	4,0
	112,5	220 ou 380	550	2000	97,78	97,25	1,84	3,59	4,0

Fig. 218

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS MÉDIOS, PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR; FREQUÊNCIA: 60 Hz; CLASSE DE TENSÃO: 15 kV

POTÊNCIA kVA	BAIXA TENSÃO: 220 a 660 V				BAIXA TENSÃO: 2400 a 4800 V				PESO Fe + Cu kg	
	PERDAS kW		I.Z%	PESO Fe + Cu kg	PERDAS kW		I.Z%			
	Ferro	Cobre			Ferro	Cobre				
750	1,9	7,20	5,0	1850	1000	2,52	8,64	5,0	2100	
1000	2,52	8,64	5,0	2100	1500	3,40	11,25	5,0	2700	
1500	3,51	11,61	5,0	2700	2000	4,33	14,12	5,0	3300	
2500	5,31	17,10	5,0	3900	2500	5,20	14,60	5,0	3800	
					3750	7,65	23,31	5,0	5300	

Fig. 219

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS MÉDIOS, PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR; FREQUÊNCIA: 60 Hz; CLASSE DE TENSÃO: 25 kV

POTÊNCIA kVA	BAIXA TENSÃO: 2400 a 5000 V				BAIXA TENSÃO: 6000 a 7200 ou 12 000 a 14 000 V			
	PERDAS kW		I.Z%	PESO Fe + Cu kg	PERDAS kW		I.Z%	PESO Fe + Cu kg
	Ferro	Cobre			Ferro	Cobre		
1000	2,79	8,91	5,5	2300	2,79	8,91	5,5	2300
1500	3,51	11,99	5,5	2900	3,51	11,99	5,5	2900
2000	4,40	14,90	5,5	3600	4,40	14,90	5,5	3600
2500	5,50	17,70	5,5	4500	5,50	17,70	5,5	4500
3750	7,80	25,50	5,5	5500	7,80	25,50	5,5	5500
5000	9,50	29,50	5,5	6600	9,50	29,50	5,5	6600
7500	11,45	40,55	5,5	8700	11,45	40,55	5,5	8700

Fig. 220

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS MÉDIOS, PARA INSTALAÇÃO INTERIOR OU EXTERIOR; FREQUÊNCIA: 60 Hz; CLASSE DE TENSÃO: 34,5 kV

POTÊNCIA kVA	BAIXA TENSÃO: 2400; 4800 ou 7200 V				BAIXA TENSÃO: 12 000 a 14 400 V			
	PERDAS kW		I.Z%	PESO Fe + Cu kg	PERDAS kW		I.Z%	PESO Fe + Cu kg
	Ferro	Cobre			Ferro	Cobre		
1000	3,24	8,64	6,0	2400	3,30	8,40	6,0	2400
1500	4,08	12,12	6,0	3000	4,15	12,05	6,0	3000
2000	4,95	14,85	6,0	3600	5,00	14,80	6,0	3600
2500	5,90	17,20	6,0	4200	6,00	17,10	6,0	4200
3750	8,10	22,50	6,0	5500	8,20	22,40	6,0	5500
5000	10,00	27,90	6,0	6900	10,00	27,90	6,0	6900
7500	13,50	38,50	6,0	9000	13,50	38,50	6,0	9000
10 000	17,00	48,70	6,0	11 100	17,00	48,70	6,0	11 100

Fig. 221

Para transformadores com circulação do óleo e refrigeração com água externa, as perdas no cobre podem ser cerca de 40% maiores que as indicadas nas tabelas. Nas mesmas condições de refrigeração, as perdas no ferro podem ser consideradas cerca de 10% maiores que as indicadas nas tabelas.

O cálculo das perdas é feito conforme parágrafos 11 e 23.

78) ESCOLHA DA DENSIDADE DE CORRENTE E DA INDUÇÃO

A escolha da densidade de corrente nos enrolamentos de um transformador depende do tipo de refrigeração, do rendimento que o transformador deve ter e da potência do transformador.

Os valores indicados na tabela da fig. 222 são relativos a transformadores em óleo com refrigeração natural.

kVA	5	10	25	50	100	500	1000	5000
A/mm ²	1,8	2,0	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8

Fig. 222

Para transformadores com circulação de óleo e resfriamento externo com água, os valores da tabela podem ser aumentados de 15%.

Os valores da tabela servem unicamente para orientar o cálculo, pois os definitivos serão estabelecidos com base no aquecimento do transformador.

A indução no núcleo dos transformadores resfriados com óleo, varia entre 11 000 gauss para os pequenos e 15 000 gauss para os grandes.

79) TENSÃO DE CURTO-CIRCUITO E QUEDA DE TENSÃO

A queda de tensão industrial, examinada no parágrafo 22, pode ser avaliada pela fórmula aproximada

$$\Delta E_2 = R''_e \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X''_e \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

ou $\Delta E_1 = R'_e \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X'_e \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2$

sendo $\Delta_e = \frac{\Delta E_1}{V_1}$

Os valores da queda de tensão e da tensão de curto-circuito dos transformadores, em função de sua potência nominal, estão indicados nas tabelas das figs. 210 a 221.

80) CÁLCULO DA SEÇÃO DO NÚCLEO

A potência de um transformador monofásico é expressa em kVA por

$$W_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot 10^{-3}$$

Indicando com S_{Fe} a seção do núcleo e com B_M o valor máximo da indução no núcleo, o valor máximo do fluxo resulta: $\phi_M = B_M \cdot S_{Fe}$ e o valor de $V_2 = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \phi_M \cdot N_2$.

O valor da corrente I_2 pode ser expresso pelo produto da seção S_2 do condutor do circuito secundário pela densidade de corrente d_2 existente neste mesmo circuito, isto é, $I_2 = S_2 \cdot d_2$. Substituindo-se o valor de V_2 e o de I_2 na fórmula da potência, esta será expressa por:

$$W_2 = 10^{-11} \cdot 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot B_M \cdot S_{Fe} \cdot S_2 \cdot d_2$$

Supondo que o peso do cobre empregado no circuito primário seja igual ao peso do empregado no secundário, o peso total do cobre empregado no transformador, expresso em kg, é:

$$P_{cu} = 2 \cdot 8,9 \cdot (N_2 \cdot S_2) \cdot l_{cu} \cdot 10^{-5}$$

O fator 8,9 representa o peso específico do cobre; S_2 representa a seção do condutor secundário expressa em mm^2 e l_{cu} representa o comprimento médio dos enrolamentos primário e secundário, expresso em centímetros.

Desta última equação resulta:

$$N_2 S_2 = \frac{10^5 \cdot P_{cu}}{17,8 \cdot l_{cu}}$$

Substituindo este valor na equação da potência obtém-se:

$$W_2 = \frac{10^{-11} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_M \cdot S_{Fe} \cdot d_2 \cdot 10^5 \cdot P_{cu}}{17,8 \cdot l_{cu}} = \frac{10^{-6} \cdot f \cdot B_M \cdot S_{Fe} \cdot d_2 \cdot P_{cu}}{4 \cdot l_{cu}}$$

Admitindo-se que a seção do circuito magnético seja constantemente igual à do núcleo (S_{Fe}) e indicando com l_{Fe} o comprimento total do ferro, o peso deste é:

$$P_{Fe} = 7,8 \cdot S_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot 10^{-3}$$

O peso do ferro P_{Fe} será expresso em kg se a seção do núcleo S_{Fe} for expressa em cm^2 e o comprimento l_{Fe} em centímetros.

Multiplicando-se esta última equação pela da potência resulta:

$$W_2 \cdot P_{Fe} = \frac{10^{-9} \cdot 7,8 \cdot f \cdot B_M \cdot S_{Fe}^2 \cdot l_{Fe} \cdot P_{cu} \cdot d_2}{4 \cdot l_{cu}}$$

de onde

$$\begin{aligned} S_{Fe}^2 &= 10^9 \cdot \frac{4}{7,8} \cdot \frac{l_{cu}}{l_{Fe}} \cdot \frac{W_2}{f \cdot d_2 \cdot B_M} \cdot \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} = \\ &= 10^9 \cdot 0,524 \cdot \frac{l_{cu}}{l_{Fe}} \cdot \frac{W_2}{f \cdot d_2 \cdot B_M} \cdot \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} \end{aligned}$$

Substituindo os pesos pelas respectivas relações entre perdas e perdas específicas, isto é,

$$\begin{aligned} \frac{W_{Fe}}{P_{Fe}} &= \frac{W_{Fe}}{W_{cu}} = \frac{W_{Fe}}{W_{Fe}} \\ \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} &= \frac{W_{Fe}}{W_{cu}} = \frac{W_{Fe}}{W_{Fe}} \\ \frac{W_{cu}}{W_{Fe}} &= \frac{W_{Fe}}{W_{Fe}} \end{aligned}$$

$$S_{Fe} = \sqrt{10^9 \cdot 0,524 \cdot \frac{W_2 \cdot \frac{W_{cu}}{W_{Fe}} \cdot \frac{l_{cu}}{l_{Fe}}}{f \cdot d_2 \cdot B_M \cdot \frac{W_{cu}}{W_{Fe}}}} =$$

$$= 72,8 \sqrt{\frac{l_{cu}}{l_{Fe}}} \cdot \sqrt{\frac{W_2 \cdot \frac{W_{cu}}{W_{Fe}} \cdot 10^5}{f \cdot \frac{W_{cu}}{W_{Fe}} \cdot d_2 \cdot B_M}}$$

A relação dos comprimentos l_{cu} e l_{Fe} sofre pequenas variações para transformadores do mesmo tipo. A equação acima escrita é válida também para os transformadores trifásicos.

Agrupando os fatores 72,8 $\sqrt{\frac{l_{cu}}{l_{Fe}}}$ numa única constante C, os valores da mesma podem ser obtidos na tabela da fig. 223.

VALORES DA CONSTANTE C

Tipos de Núcleos	Monofásicos	Trifásicos
Transformadores de núcleo envolvido com bobinas redondas	45	38
Transformadores de núcleo envolvido com bobinas retangulares	55	45
Transformadores de núcleo envolvente	65	55

Fig. 223

81) DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DA JANELA

Conhecidos o número das espiras primárias N_1 , o número das espiras secundárias N_2 e as respectivas correntes que as atravessam I_1 e I_2 , pode-se calcular o número das Ampère-espiras totais que atuam sobre o núcleo, isto é, $N_1I_1 + N_2I_2$.

Se o núcleo for muito comprido estas Ampères-espiras atuam de forma diluída, cabendo um número pequeno de Ampère-espiras por cada centímetro de comprimento do núcleo.

Se o núcleo for muito curto, as Ampère-espiras atuam em forma concentrada e por conseguinte a cada centímetro de comprimento corresponde um elevado número de Ampère-espiras.

Se o número das Ampère-espiras por centímetro for pequeno, a janela do transformador será muito alta e estreita. Dita janela será baixa e larga se o número das Ampère-espiras por centímetro for grande.

Para que a janela do transformador seja bem proporcionada, é preciso que o número das Ampère-espiras por centímetro, que se indica com A, seja compreendido dentro de limites convenientes.

Uma vez conhecido o valor de A, o valor da altura H da janela, expresso em centímetros é dado por:

$$H = \frac{N_1 I_1 + N_2 I_2}{A}$$

Os valores de A, para transformadores resfriados com ar, estão indicados na tabela da fig. 224, em função da potência nominal.

TRANSFORMADORES RESFRIADOS COM AR								
kVA	0,25	0,5	1	2,5	5	10	25	50
A	70	80	90	105	115	125	140	160

Fig. 224

Para os transformadores resfriados com óleo, os valores de A em função da potência nominal do transformador estão indicados na tabela da fig. 225.

VALORES DE "A" PARA TRANSFORMADORES RESFRIADOS EM ÓLEO													
kVA		10	20	30	50	75	100	250	500	750	1000	2500	5000
A	15 kV	150	220	260	330	380	440	570	690	730	790	900	1000
	30 kV	—	—	180	250	300	370	530	660	720	780	890	995

Fig. 225

Os valores de A para tensões superiores a 30 kV deverão ser reduzidos.

Calculado o número das espiras N_1 e N_2 , determinada a seção dos respectivos enrolamentos S_1 e S_2 , a seção total do cobre, na janela, resulta:

Para transformador de núcleo envolvente

$$S_{cu} = (N_1 S_1 + N_2 S_2)$$

Para transformador de núcleo envolvido

$$S_{cu} = 2(N_1 S_1 + N_2 S_2)$$

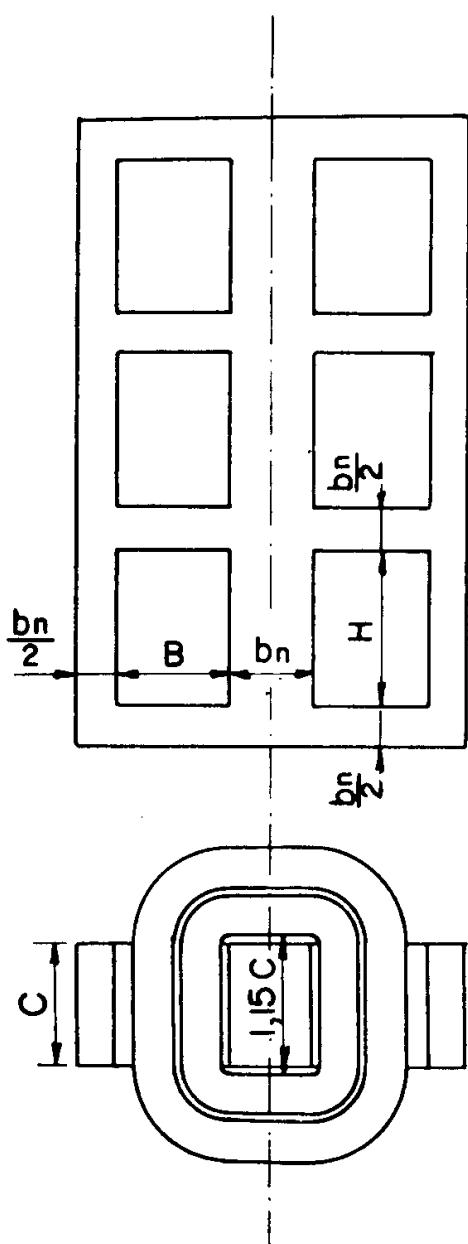


Fig. 226

A relação entre a seção total do cobre S_{cu} existente na janela e a seção da janela S_j , chama-se fator de enchimento, que é expresso por:

$$f_{cu} = \frac{S_{cu}}{S_j}$$

Para transformadores de núcleo envolvido, resfriados com ar, os valores dos fatores de enchimento, em função da potência estão indicados na tabela da fig. 228.

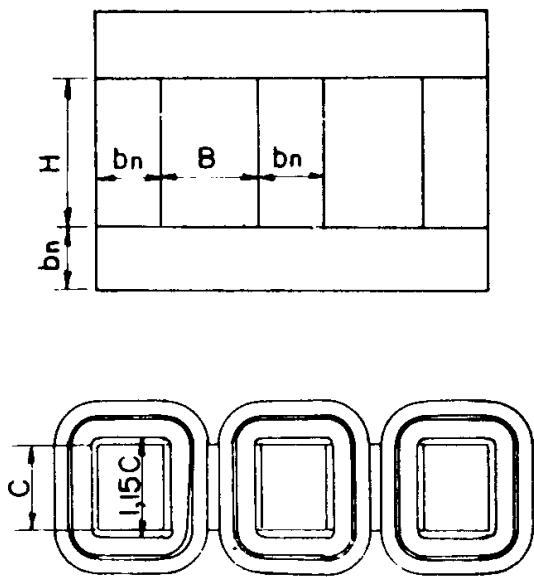


Fig. 227

FATORES DE ENCHIMENTO PARA TRANSFORMADORES COM NÚCLEO ENVOLVIDO, RESFRIADOS COM AR

kVA	0,25	0,5	1	2,5	5	10	25	50
f_{cu}	0,1	0,116	0,136	0,166	0,196	0,224	0,276	0,32

Fig. 228

Para transformadores de núcleo envolvido, resfriados com óleo, os valores dos fatores de enchimento, em função da potência estão indicados na tabela da fig. 229.

FATORES DE ENCHIMENTO PARA TRANSFORMADORES DE NÚCLEO ENVOLVIDO, RESFRIADOS COM ÓLEO

kVA	50	75	100	250	500	750	1000	2500	5000	
f_{cu}	5000 V	0,25	0,28	0,30	0,35	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43
	15 000 V	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36
	30 000 V	0,125	0,15	0,16	0,18	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24

Fig. 229

Para transformadores de núcleo envolvente, resfriados com óleo, os valores dos fatores de enchimento, em função da potência estão indicados na tabela da fig. 230.

FATORES DE ENCHIMENTO PARA TRANSFORMADORES DE NÚCLEO ENVOLVENTE, RESFRIADOS COM ÓLEO

kVA	50	75	100	250	500	750	1000	2500	5000	
f_{cu}	10 000 V	0,18	0,20	0,22	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
	30 000 V	0,11	0,125	0,14	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23

Fig. 230

Conhecido o fator de enchimento as equações da seção total do cobre na janela são expressas por:

Transformador de núcleo envolvido: $2(N_1S_1 + N_2S_2) = 100 \cdot f_{cu} \cdot H \cdot B$

Transformador de núcleo envolvente: $N_1S_1 + N_2S_2 = 100 \cdot f_{cu} \cdot H \cdot B$

O valor da largura da janela será expresso por:

Transformador de núcleo envolvido:

$$B = \frac{2(N_1 S_1 + N_2 S_2)}{100 \cdot f_{eu} \cdot I}$$

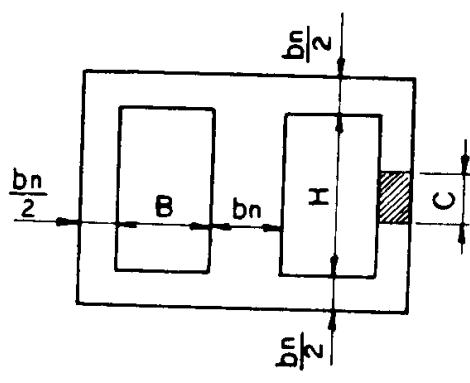
Transformador de núcleo envolvente:

$$B = \frac{N_1 S_1 + N_2 S_2}{100 \cdot f_{eu} \cdot H}$$

82) PESO DO NÚCLEO

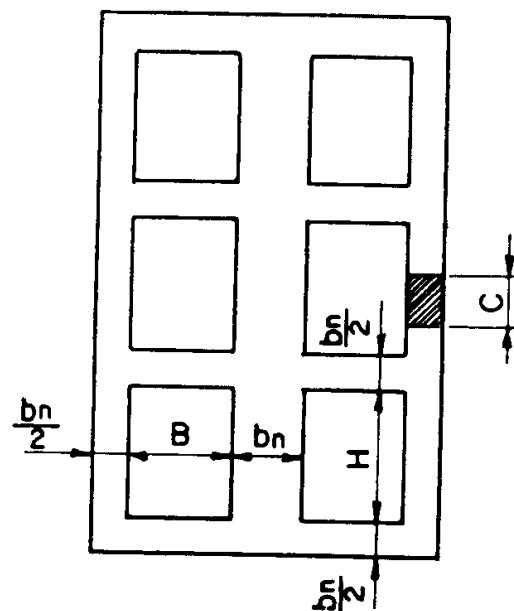
Para o transformador de núcleo envolvente, monofásico e trifásico, o peso do núcleo em quilos é calculado com as fórmulas indicadas nas figs. 231 e 232.

Para os transformadores de núcleo envolvido, monofásicos e trifásicos, o peso do núcleo em quilos é calculado com as fórmulas indicadas nas figs. 233 e 234.



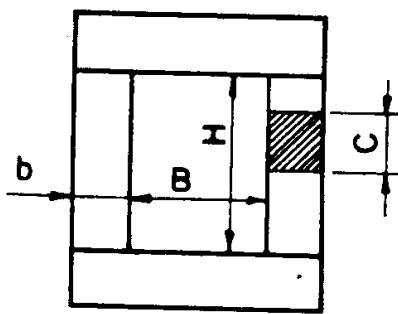
$$P_{Fe} = 7,8 \cdot S_{Fe} \cdot 2(H + B + b_n) \cdot 10^{-3}$$

Fig. 231



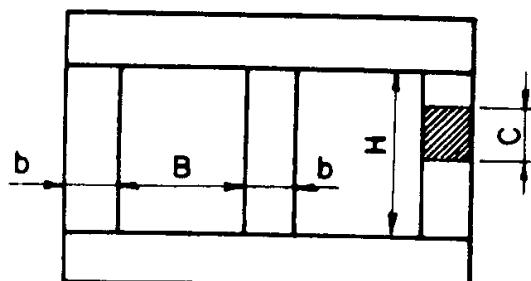
$$P_{Fe} = 7,8 \cdot S_{Fe} \cdot 2(3H + 2B + 2b_n) \cdot 10^{-3}$$

Fig. 232



$$P_{Fe} = 7,8 \cdot S_{Fe} \cdot 2(H + B + 2b) \cdot 10^{-3}$$

Fig. 233



$$P_{Fe} = 7,8 \cdot S_{Fe} \cdot (3H + 4B + 6b) \cdot 10^{-3}$$

Fig. 234

83) PESO DO COBRE

O cálculo das perdas pode ser feito com base no peso total do cobre e na densidade de corrente média entre a do circuito primário e a do secundário.

O comprimento da espira média, relativa aos dois enrolamentos é avaliado, com suficiente aproximação, pelas fórmulas seguintes, referentes às figs. 231 a 234.

- Para núcleos envolvidos com seção em cruz $l_{cu} = \pi [b_n + (B/2) \cdot 0,8]$
- Para núcleos envolvidos com seção retangular $l_{cu} = 2 [b_n + 1,15 \cdot C + (\pi/4) B \cdot 0,8]$
- Para núcleos envolventes $l_{cu} = 2 [b_n + 1,15 \cdot C + (\pi/2) B \cdot 0,8]$

Expressando l_{cu} em centímetros e considerando a seção do condutor do circuito primário S_{cu1} expressa em milímetros quadrados, o peso total do cobre, em quilos, por coluna resulta:

$$P_{cu1} = 8,9 \cdot 2 \cdot N_1 \cdot S_{cu1} \cdot l_{cu} \cdot 10^{-5}$$

O peso total do cobre do transformador é:

Transformador monofásico de núcleo envolvente $P_{cu} = P_{cu1}$

Transformador monofásico de núcleo envolvido $P_{cu} = 2 P_{cu1}$

Transformador trifásico de núcleo envolvido ou núcleo envolvente

$P_{cu} = 3 P_{cu1}$

84) CÁLCULO DAS PERDAS

Escolhidos o tipo de lâmina e a indução que se deseja obter nas mesmas, calcula-se a perda específica no ferro, conforme parágrafo 10.

$$w_{Fe} = w_{Fe-10} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

As perdas totais em watts que se verificam no ferro são calculadas por:

$$W_{Fe} = w_{Fe} \cdot P_{Fe}$$

Conhecida a densidade de corrente d, as perdas específicas no cobre, conforme parágrafo 23, são avaliadas por:

$$w_{cu} = 2,7 \cdot d^2$$

As perdas totais, em watts, no cobre são calculadas por:

$$W_{cu} = w_{cu} \cdot P_{cu}$$

Se as perdas calculadas possuírem valores aproximados dos preestabelecidos, poder-se-á prosseguir o cálculo do transformador. Obtendo-se valores muito diferentes dos preestabelecidos é preciso mudar a altura e a largura da janela. Com a mudança das dimensões citadas, a relação:

$$\frac{W_{cu}}{W_{Fe}}$$

varia em sentido oposto à variação da altura da janela.

CAPÍTULO IX

AQUECIMENTO DOS TRANSFORMADORES

85) PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DO CALOR

As perdas que se produzem no ferro e no cobre de um transformador geram calorias que provocam a elevação de temperatura das partes ativas do aparelho.

Por efeito desta elevação de temperatura cria-se um desequilíbrio térmico entre a parte aquecida e o ambiente (ar ou óleo), transmitindo-se para este uma parte das calorias produzidas.

A temperatura deixa de elevar-se quando o número das calorias transmitidas ao ambiente é igual ao número das calorias produzidas pelas perdas. A transmissão de calorias para o ambiente processa-se através da superfície de contato entre a parte aquecida e o meio ambiente.

Do exposto comprehende-se que a elevação de temperatura da parte ativa do transformador é diretamente proporcional às perdas que nela se produzem e inversamente proporcional à superfície de contato entre esta e o meio ambiente, dependendo ainda do material de que a parte ativa é constituída e do elemento refrigerante.

Nos transformadores o elemento refrigerante é o ar ou o óleo isolante. Assim sendo existem os seguintes tipos de resfriamento, isto é:

- 1 — Resfriamento natural (com ar) — (SN)
- 2 — Resfriamento com ventilação forçada (SVF)
- 3 — Resfriamento por circulação natural do líquido isolante (LN)
- 4 — Resfriamento por circulação natural do líquido isolante e ventilação forçada sobre o tanque e radiadores (LN — VF)
- 5 — Refrigeração em óleo com serpentina de água interna (LN — ACF)
- 6 — Refrigeração em óleo com serpentina de água externa (LCF — ACF)

86) RESFRIAMENTO NATURAL DE TRANSFORMADORES SECOS COM AR (SN)

Nos transformadores secos com resfriamento natural com ar, o calor é fornecido da superfície emissora diretamente ao ar ambiente por irradiação e por convecção.

A relação entre a potência perdida em watts e a superfície de contato entre o elemento aquecido e o ar ambiente, fornece a quantidade de watts perdidos que correspondem a uma unidade de superfície de transmissão. Esta relação caracteriza o aquecimento do elemento considerado e deve ser contida entre determinados limites, conforme se verá a seguir.

a) *Aquecimento do núcleo*

Nos transformadores resfriados com ar, o espaço existente entre as bobinas e o núcleo, não é suficiente para que as superfícies externas dos núcleos possam ser consideradas como superfícies de transmissão de calor. Assim sendo, as calorias produzidas no núcleo deverão ser transmitidas ao ar pelas superfícies do núcleo existentes externamente às bobinas.

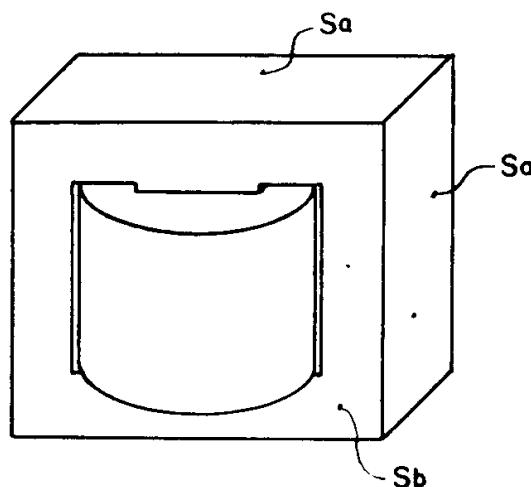


Fig. 235

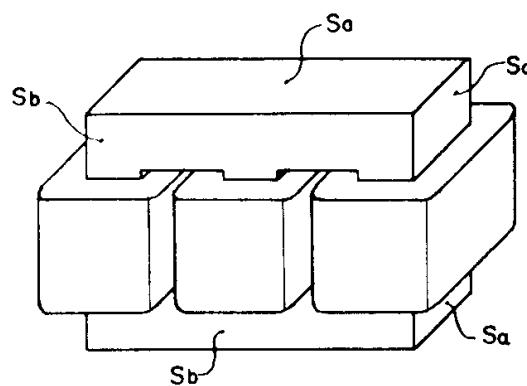


Fig. 236

O fluxo térmico se propaga facilmente no sentido da lamação. Por isso as superfícies S_a das figs. 235 e 236 devem ser consideradas integralmente, enquanto das duas superfícies S_b , somente uma será considerada (a frontal ou a posterior).

Se houver canal de ventilação, será considerada somente uma das superfícies do mesmo.

O coeficiente de adução para o núcleo de ferro pode ser considerado $K_F = 12 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, isto é, à irradiação de 12 watts por metro quadrado de superfície corresponde a elevação de temperatura de 1°C .

Conhecendo-se as perdas no ferro W_{Fe} em watts e a superfície total de transmissão S_{tr} em metros quadrados, as perdas correspondentes a cada metro quadrado desta são obtidas por:

$$W_{Fe}/m^2 = \frac{W_{Fe}}{S_{tr}}$$

A elevação de temperatura da superfície do núcleo resulta:

$$\Delta t = \frac{W_{Fe}/m^2}{K_F}$$

Exemplo — Calcular a elevação da temperatura alcançada pelo núcleo do transformador trifásico indicada na fig. 237 sabendo-se que as perdas totais no ferro são: $W_{Fe} = \sim 22$ watts.

$$S_a = 2 \cdot 20 \cdot \frac{5}{1,1} + 4 \cdot 4 \cdot \frac{5}{1,1} = 254 \text{ cm}^2$$

$$S_b = 2 \cdot 20 \cdot 4 = 160 \text{ cm}^2$$

$$S_{tr} = S_a + S_b = 414 \text{ cm}^2$$

$$W_{Fe}/m^2 = \frac{22}{0,041} = \sim 537$$

$$\Delta t = \frac{W_{Fe}/m^2}{K_F} = \frac{537}{12} = 45^\circ\text{C}$$

b) Aquecimento da bobina

A elevação de temperatura da bobina é diretamente proporcional às perdas de potência W_{cu} que se verificam por efeito Joule nos seus condutores e inversamente proporcional à superfície de transmissão.

Nas bobinas não subdivididas considera-se como superfície de transmissão unicamente a superfície lateral das mesmas.

Nas bobinas subdivididas, considera-se como superfície de transmissão a soma da superfície lateral e uma superfície lateral de cada canal de ventilação.

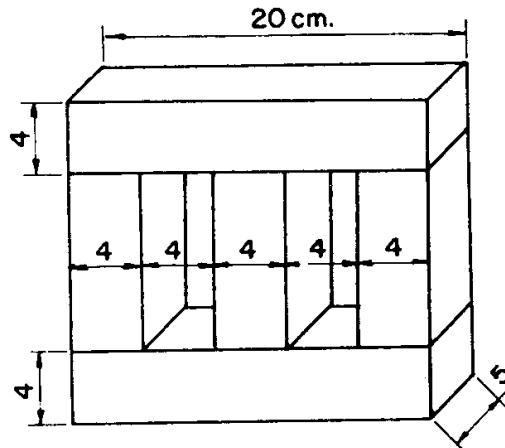
Conhecida a superfície total de transmissão S_{tr} calcula-se a relação

$$W_{cu}/m^2 = \frac{W_{cu}}{S_{tr}}$$

A sobrelevação de temperatura da superfície da bobina é obtida por

$$\Delta t = \frac{W_{cu}/m^2}{K_{cu}}$$

Fig. 237



K_{cu} pode ser considerado $20 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Aparentemente este valor é elevado; entretanto, é preciso lembrar que é referido unicamente à superfície lateral da bobina.

Exemplo — Calcular o aquecimento da bobina do transformador trifásico indicado na fig. 238 sabendo-se que a perda total do cobre é $W_{cut} = 96 \text{ watts}$.

A potência total perdida em cada bobina é

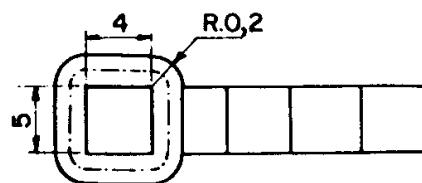
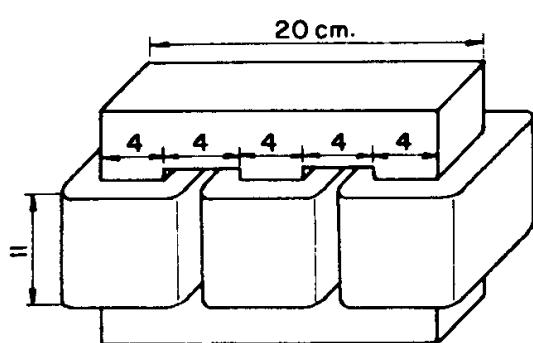


Fig. 238

$$W_{cu} = \frac{W_{cut}}{3} = \frac{96}{3} = 32 \text{ watts}$$

Sendo a bobina não subdividida, para efeito do resfriamento considera-se unicamente a superfície externa cujo valor é obtido por:

$$S_{tr} = [2.5 + 2.4 + 2 \cdot \pi \cdot 2] \\ 11 = 335,5 \text{ cm}^2$$

$$W_{cu}/\text{m}^2 = \frac{W_{cu}}{S_{tr}} = \frac{32}{0,03355} = \\ 954$$

$$\Delta_t = \frac{W_{cu}/\text{m}^2}{K_{cu}} = \frac{954}{20} = 47,7^\circ\text{C}$$

87) RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES SECOS COM VENTILAÇÃO FORÇADA (SVF)

Com o resfriamento artificial que é obtido por meio de ventilação forçada, pode-se considerar o valor do coeficiente de adução como sendo o dobro do considerado pela refrigeração natural, isto é, $K_{cu} = 40$ para a bobina e $K_{Fe} = 28$ para o núcleo.

Para o cálculo da capacidade do ventilador devem ser computadas as perdas no ferro W_{Fe} e as perdas no cobre W_{cu} , isto é

$$W_t = W_{Fe} + W_{cu}$$

Uma vez conhecidas as perdas totais W_t , que se verificam no transformador, a quantidade de ar em metros cúbicos por minuto necessária ao resfriamento do mesmo é fornecida por:

$$Q = \frac{0,24 \cdot W_t \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot T \cdot p \cdot c}$$

na qual: Q é a quantidade de ar em metros cúbicos por minuto que deve ser fornecida por um ventilador; W_t as perdas totais em watts; o produto $0,24 \cdot W_t \cdot 60 \cdot 10^{-3}$ representa o número de grandes calorias produzidas em cada minuto; T é a elevação de temperatura do ar, expressa em graus centígrados; p é o peso específico do ar (1,2); c é o calor específico do ar em calorias por kg (0,237); e 0,5 representa o rendimento da refrigeração.

Substituindo-se os valores mencionados e simplificando-se a fórmula resulta:

$$Q = \frac{0,1 \cdot W_t}{T}$$

Considerando-se por exemplo a sobrelevação do ar de 25°C , a fórmula transforma-se em:

$$Q = \frac{W_t}{250}$$

88) RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES EM ÓLEO, COM VENTILAÇÃO NATURAL (LN)

A eficiência do resfriamento em óleo baseia-se sobre o fato de que o líquido, em contato com a parte ativa dos transformadores, aquece, tornando-se menos denso que o líquido menos aquecido.

O óleo menos denso, encontrando-se numa massa líquida com densidade maior, desloca-se para cima. Este deslocamento força as camadas superiores a se deslocarem para baixo.

Assim sendo, em pouco tempo estabelece-se no tanque, conforme fig. 239, uma circulação de óleo que no centro é ascendente e na periferia é descendente.

O óleo central, ascendente, retira calorias das partes ativas do transformador enquanto o óleo periférico transmite calorias para as paredes do tanque e estas por sua vez as transmitem para o ar.

Para que o calor seja retirado das partes ativas do transformador é preciso que estas possuam uma temperatura superior à do óleo. O óleo, por sua vez, deve possuir uma temperatura superior àquela das paredes do tanque para poder fornecer calorias para estas e essas serem ir-

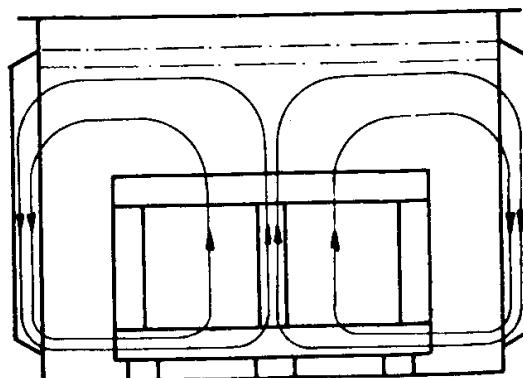


Fig. 239

diadas para o ar. A resistência térmica oferecida pela chapa do tanque é desprezível.

A transferência do calor das paredes do tanque para o ar ambiente processa-se em grande parte por convecção e em menor parte por irradiação.

O resfriamento é eficiente quando o calor é transmitido das paredes do tanque para o ar sem que a temperatura dos enrolamentos, do ferro e do óleo, supere os valores fixados pelas normas, que são os indicados na tabela da fig. 191.

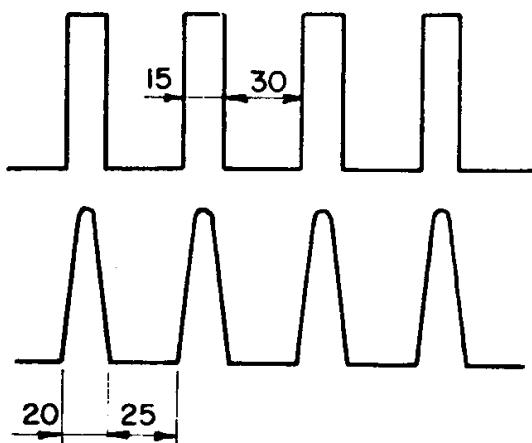


Fig. 240

A transmissão do calor do tanque para o ar é eficiente se os canais de ar possuem 30 mm de largura e os do óleo 15 mm.

Através dos canais de ar com 30 mm de largura estabelece-se uma correnteza de ar enérgica, que consegue retirar o calor das paredes do tanque.

A forma dos canais de ar e canais do óleo está representada na fig. 240.

Para o cálculo da superfície transmissora de calor, considera-se a altura eficaz H_{ef} que é:

- Tanque liso, com ou sem conservador de óleo; H_{ef} corresponde à altura da caixa, conforme fig. 241.
- Tanque ondulado; H_{ef} corresponde ao comprimento do vértice do canal, conforme fig. 242.

Nos tanques a maior parte das calorias transmite-se ao ar por convecção ao longo das paredes laterais. A transmissão de calor através da

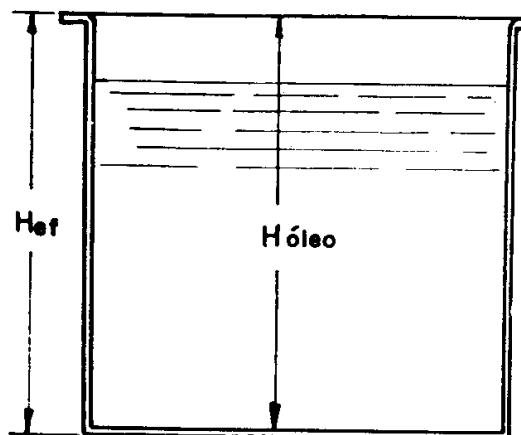


Fig. 241

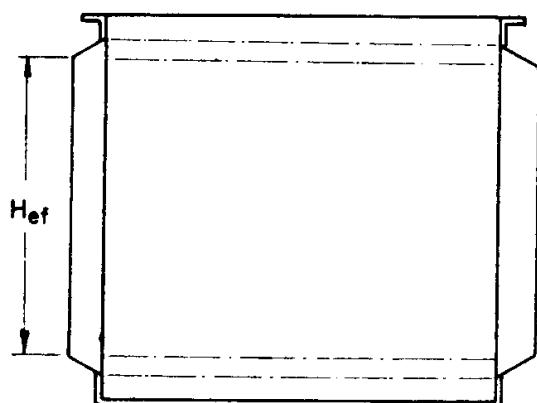


Fig. 242

tampa e do fundo processa-se por irradiação, representando uma pequena parte do calor transmitido, pelo que se costuma desprezá-la totalmente.

A relação entre o número que expressa a potência perdida em watts e a superfície de transmissão medida em metros quadrados fornece a quantidade de watts que deve ser transmitida para o ar por cada metro quadrado de superfície, isto é,

$$\frac{W_t}{m^2} = \frac{W_t}{S_{tr}}$$

Conhecendo-se o coeficiente de adução K, isto é, a quantidade de watts cedida para o ar, por cada metro quadrado da superfície transmissora por cada grau centígrado de elevação da temperatura, é possível calcular-se a elevação da temperatura da superfície do tanque, pois:

$$\Delta t = \frac{W/m^2}{K} = \frac{W_t}{S_{tr} \cdot K}$$

O valor do coeficiente de adução K pode ser considerado:

$$K = 12 \text{ watts/m}^2 \text{ por } {}^\circ\text{C}$$

Calculada a elevação de temperatura do tanque calcula-se a elevação média da temperatura do óleo, pois esta em geral é de 5°C superior à do tanque. Assim sendo:

$$\Delta t_o = \Delta t + 5^\circ\text{C}$$

Conforme as normas da ABNT, tabela da fig. 191, a elevação do óleo não deve superar 55°C para tanques sem conservador e 60°C para tanques com conservador de líquido.

Com os tanques de chapa ondulada, é possível construir transformadores até 5000 kVA. Utilizando-se tubos em substituição à chapa ondulada podem ser construídos transformadores até 20 000 kVA. Para transformadores com potência superior à mencionada usam-se câmaras de refrigeração.

Exemplo 1

Calcular a elevação de temperatura do óleo de um transformador de 200 kVA, cujas perdas totais são 3225 watts.

As dimensões internas do tanque são as indicadas na fig. 243. O transformador possui conservador de óleo e a superfície de transmissão de calor é calculada com base na altura eficaz $H_{ef} = 850 \text{ mm}$.

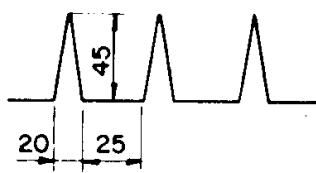
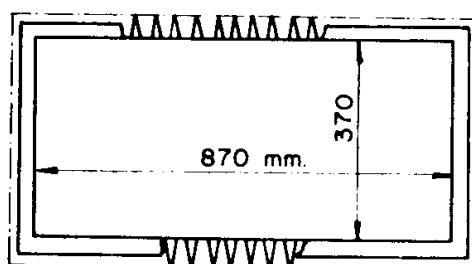
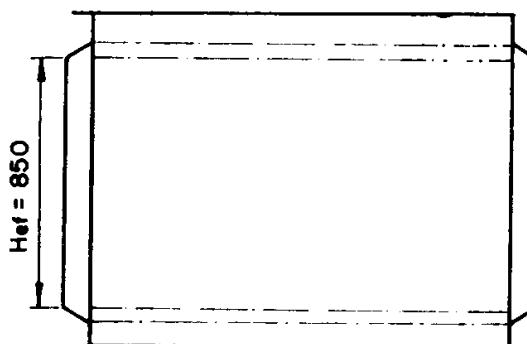


Fig. 243

Sendo o passo das ondulações igual a 45 mm, é possível colocar 16 no sentido do comprimento e 6 no sentido da largura.

Número total de ondulações $2(16 + 6) = 44$.

O perímetro da caixa resulta:

$$P = 2.870 + 2.370 + 44.90 = \\ = 6440 \text{ mm} = 6,44 \text{ m.}$$

A superfície de transmissão é:

$$S_{tr} = 6,44 \cdot 0,85 = 5,474 \text{ m}^2.$$

A elevação de temperatura da superfície do tanque é:

$$\Delta t = \frac{W_t}{S_{tr} \cdot K} = \frac{3225}{5,474 \cdot 12} = \sim 49^\circ\text{C}$$

Sendo a diferença de temperatura entre óleo e chapa de 5°C , a elevação de temperatura do óleo é:

$$\Delta t_o = 49 + 5 = 54^\circ\text{C}$$

A elevação de temperatura, calculada, está dentro dos limites previstos pelas normas.

Exemplo 2

Calcular a elevação de temperatura do óleo de um transformador de 15 kVA com conservador de óleo, cujas perdas totais são 635 watts. O tanque é liso e possui as dimensões indicadas na fig. 244.

Superfície de irradiação:

$$S_{tr} = 2(0,60 + 0,27) \cdot 0,68 = 1,18 \text{ m}^2$$

Elevação de temperatura do tanque:

$$\Delta t = \frac{W_t}{S_{tr} \cdot K} = \frac{635}{1,18 \cdot 12} = 45^\circ\text{C}$$

Elevação de temperatura do óleo:

$$\Delta t_o = \Delta t + 5 = 45 + 5 = 50^\circ\text{C}$$

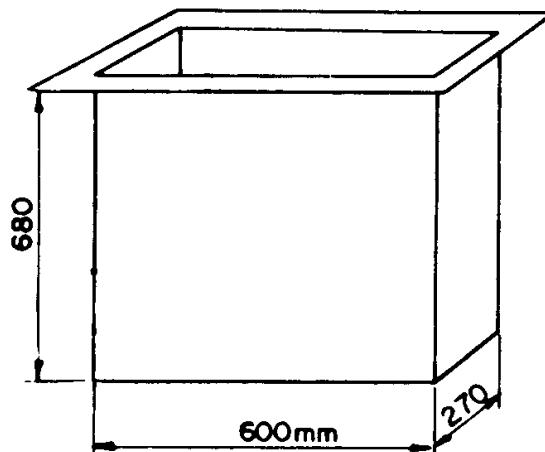


Fig. 244

A elevação de temperatura calculada está dentro dos limites previstos pelas normas.

Exemplo 3

Calcular a elevação de temperatura do óleo de um transformador de distribuição de 10 kVA, cujas perdas totais são 385 watts. A forma do tanque é a indicada na fig. 245; o tanque não possui conservador de óleo.

Considera-se como superfície de transmissão a superfície lateral do tanque.

$$S_{tr} = \pi \cdot 0,355 \cdot 0,71 = 0,79 \text{ m}^2$$

A elevação de temperatura da superfície do tanque é:

$$\Delta t = \frac{385}{0,79 \cdot 12} = \sim 41^\circ\text{C}$$

A elevação de temperatura do óleo é:

$$\Delta t_o = \Delta t + 5 = 41 + 5 = 46^\circ\text{C}$$

A elevação de temperatura calculada está dentro dos limites previstos pelas normas.

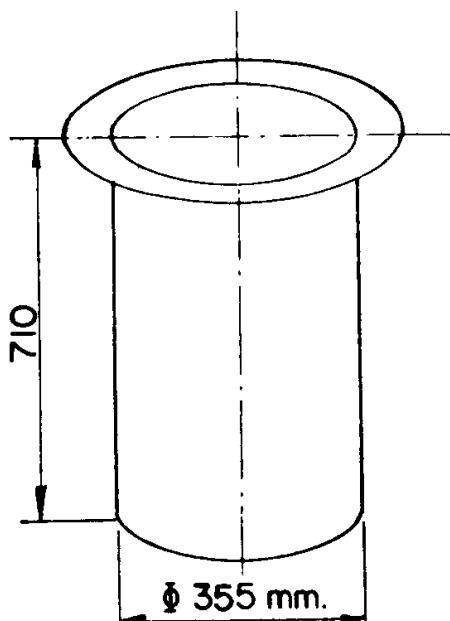


Fig. 245

89) RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES EM ÓLEO COM VENTILAÇÃO ARTIFICIAL (LN — VF)

A transferência do calor do tanque para o ar, por meio de chapa ondulada, tubos ou câmaras, pode ser aumentada consideravelmente por meio de ventilação forçada. No parágrafo 72, tabela da fig. 205, pode-se ver o acréscimo da potência de um transformador, conseguido por meio de refrigeração artificial.

A quantidade de ar a ser projetada contra as superfícies de irradiação do transformador varia entre 4 e 6 m³ por minuto.

90) RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES EM ÓLEO COM SERPENTINA DE ÁGUA INTERNA (LN — ACF)

Um processo eficiente de resfriamento do óleo dos grandes transformadores consiste no uso de serpentinas percorridas pela água refri-

gerante. A colocação das serpentinas deve ser feita nos pontos em que a temperatura do óleo é mais elevada.

Considerando-se que as perdas produzidas no transformador, sejam irradiadas em parte pelo tanque (de 10 a 15% do total) e em parte pelas serpentinas, o calor que deve ser retirado pelas serpentinas é 90% do total. A quantidade de água necessária ao resfriamento é expressa por:

$$Q_a = \frac{0,24 \cdot 0,9 \cdot W_t \cdot 60}{T} = \approx 13 \frac{W_t}{\bullet T}$$

Onde: Q_a é a quantidade de água em litro por minuto; W_t as perdas totais em kW; e T a sobrelevação de temperatura da água.

A superfície de refrigeração das serpentinas é obtida por

$$S_s = \frac{0,9 \cdot W_t \cdot 10^3}{(t_o - t_a) \cdot K}$$

na qual: S_s é a superfície de refrigeração das serpentinas expressa em metros quadrados; W_t as perdas totais em kW; $(t_o - t_a)$ a diferença de temperatura existente entre óleo e água; K é o coeficiente de transmissão global do óleo para as serpentinas e destas para a água. Considerando-se $K = 60 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, a fórmula acima escrita transforma-se em:

$$S_s = \frac{0,9 \cdot W_t \cdot 10^3}{(t_o - t_a) \cdot 60} = \frac{15 \cdot W_t}{(t_o - t_a)}$$

91) RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES EM ÓLEO COM CIRCULAÇÃO EM ÁGUA EXTERNA

Este tipo de resfriamento é realizado bombeando-se o óleo através de tubos mergulhados em água externamente ao tanque. A quantidade de óleo necessária aos transformadores refrigerados com este processo é aproximadamente a metade da que é necessária para os transformadores com refrigeração natural.

92) AQUECIMENTO DO MATERIAL ATIVO

Seja qual for o processo de resfriamento utilizado, a temperatura da parte interna do núcleo e das bobinas é consideravelmente mais alta que a do óleo ou do ar de refrigeração.

Nos transformadores de construção comum, a temperatura das partes mais quentes das bobinas e do núcleo é superior ao do meio refrigerante de um valor próximo dos 15°C.

Assim sendo, a temperatura da parte mais aquecida do núcleo e das bobinas do transformador de 150 kVA, cuja caixa está representada na fig. 243, é aproximadamente:

$$\Delta t_n = \Delta t_o + 15^\circ\text{C} = 50 + 15 = 65^\circ\text{C}$$

Esta temperatura corresponde à prevista pelas normas, cujo valor é 65°C, conforme a tabela da fig. 191.

CAPÍTULO X

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO

93) PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 5000 kVA EM ÓLEO

As características do transformador são: potência 5000 kVA; 60 Hz; alta tensão $V_1 = 30\ 000$ volts; baixa tensão $V_2 = 7200$ volts; ligação das fases primárias e secundárias em estrela; núcleo envolvido com enrolamentos cilíndricos.

Dada a potência do transformador é possível executá-lo com resfriamento em óleo e ventilação natural, podendo o tanque ser ondulado ou provido de radiadores tubulares. O projeto do referido transformador obedece ao seguinte esquema:

a) *Perdas e cálculo do núcleo*

Da tabela da fig. 221 obtém-se: perdas no ferro $W_{Fe} = 10,00$ kW; perdas no cobre $W_{cu} = 27,90$ kW.

A densidade de corrente média para os dois enrolamentos, conforme a tabela da fig. 222, pode ser considerada $d_m = 2,8$ A/mm² e portanto a perda específica no cobre, conforme parágrafo 23 é: $w_{cu} = 2,43 \cdot d^2 = 2,43 \cdot 2,8^2 = 19$ watts/kg.

Para o núcleo empregam-se chapas Armco, bitola 29, isto é, com 0,356 mm de espessura, tipo M 14, que conforme a tabela da fig. 24 apresentam para $B_M = 10\ 000$, a perda específica $w_{Fe-10} = 1,14$ watts/kg.

Escolhendo-se para a indução máxima no núcleo, conforme parágrafo 78, o valor $B_M = 13\ 400$ gauss, a perda específica no ferro é:

$$w_{Fe} = w_{Fe-10} \left(\frac{B_M}{10\ 000} \right)^2 = 1,14 \cdot \left(\frac{13\ 400}{10\ 000} \right)^2 = 2,06 \text{ W/kg.}$$

Da tabela da fig. 223 obtém-se $C = 38$ e calcula-se a seção do núcleo conforme parágrafo 80.

$$S_{Fe} = C \cdot \sqrt{\frac{W_2 \cdot \frac{w_{cu}}{w_{Fe}} \cdot 10^5}{f \cdot \frac{W_{cu}}{W_{Fe}} \cdot d \cdot B_M}} = 38 \quad \sqrt{\frac{5000 \frac{19}{2,06} \cdot 10^5}{60 \cdot \frac{27,9}{2,8} \cdot 13\ 400}} = 1030 \text{ cm}^2$$

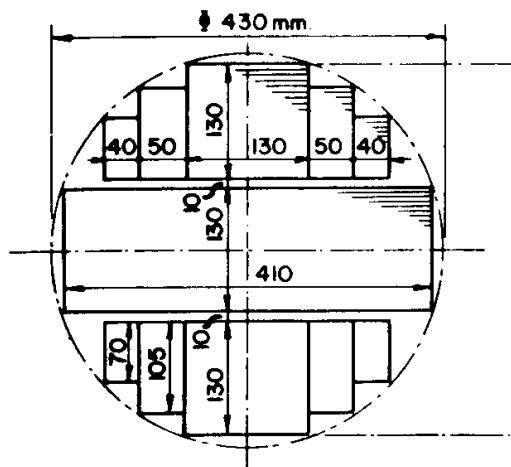


Fig. 246

Com as lâminas usadas o coeficiente de enchimento é $K_f = 0,87$, pelo que a superfície geométrica do núcleo é:

$$S'_{Fe} = \frac{S_{Fe}}{K_f} = \frac{1030}{0,87} = 1185 \text{ cm}^2$$

O núcleo será feito com formato escalonado, conforme fig. 246, possuindo dois canais de resfriamento com a largura de 1 cm.

A seção geométrica do núcleo com as dimensões indicadas na fig. 246 é:

$$S'_{Fe} = 4 \cdot 4 \cdot 7 + 4 \cdot 5 \cdot 10,5 + 2 \cdot 13 \cdot 13 + 41 \cdot 13 = 1193 \text{ cm}^2$$

A seção magnética do núcleo é $S_{Fe} = 1193 \cdot 0,87 = 1038 \text{ cm}^2$.

A seção das travessas é retangular, conforme fig. 247. A altura da travessa é:

$$h = \frac{1193}{3 \cdot 13} = \sim 30,5 \text{ cm} = 305 \text{ mm}$$

Sendo a seção magnética do núcleo $S_{Fe} = 1038 \text{ cm}^2$ e $B_M = 13\ 400$ gauss, o fluxo máximo por coluna é:

$$\phi_M = S_{Fe} \cdot B_M = 1038 \cdot 13\ 400 = \\ = 1391 \cdot 10^4 \text{ maxwell.}$$

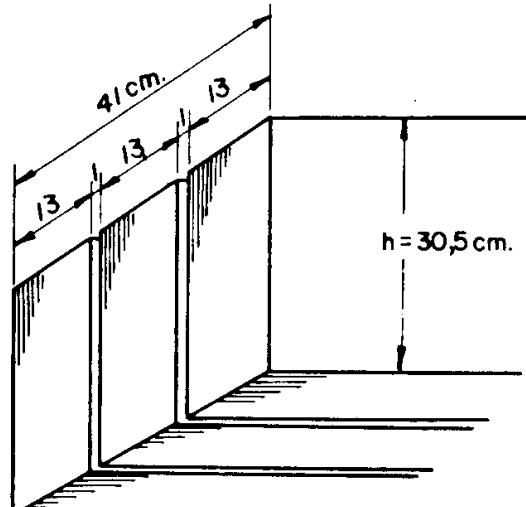


Fig. 247

Sendo o circuito A.T. conectado em estrela, a tensão de fase do mesmo é:

$$V_{f1} = \frac{V_1}{\sqrt{3}} = \frac{30\ 000}{1,73} = 17\ 341 \text{ volts}$$

O número das espiras do enrolamento A.T. é:

$$N_1 = \frac{Vf_1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \phi_M} = \frac{17\ 341 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \cdot 1391 \cdot 10^4} = \sim 466 \text{ espiras.}$$

Em correspondência à potência nominal o enrolamento de alta tensão fornece a corrente

$$I_1 = \frac{W_2 \cdot 10^3}{3 \cdot V_{f1}} = \frac{5000 \cdot 10^3}{3 \cdot 17341} = 96,3 \text{ Ampères.}$$

Tendo sido escolhida a densidade média de corrente $d = 2,8 \text{ A/mm}^2$, no circuito B.T., que é o mais curto, será utilizada a densidade $d_2 = 2,8 \cdot 1,05 = 2,94 \text{ A/mm}^2$, e no circuito A.T., a densidade $d_1 = 2,8/1,05 = 2,67 \text{ A/mm}^2$

$$S_1 = \frac{I_1}{d_1} = \frac{96,3}{2,67} = 36 \text{ mm}^2$$

Da tabela da fig. 225, à potência 5000 kVA corresponde $A = 1000$ Ampère-espiras por centímetro. O número das Ampère-espiras totais de cada coluna é: $2 N_1 I_1 = 2 \cdot 466 \cdot 96,3 = \sim 89\,752$

$$\text{A altura da janela deve ser: } H = \frac{2 N_1 I_1}{A} = \frac{89\,752}{1000} = 89,7 = \sim 90 \text{ cm.}$$

Sendo o transformador de núcleo envolvido, a seção aproximada do cobre na janela é: $S_{cu} = 2(2 N_1 \cdot S_1) = 2(2 \cdot 466 \cdot 36) = 67\,100 \text{ mm}^2$.

Da tabela da fig. 229 obtém-se o valor do fator de enchimento que é $f_{eu} = 0,24$.

A largura da janela deve ser:

$$B = \frac{S_{cu}}{100 \cdot f_{eu} \cdot H} = \frac{67\,100}{100 \cdot 0,24 \cdot 90} = \sim 31 \text{ cm.}$$

Com as medidas calculadas o núcleo deve ter a forma indicada na fig. 248.

O peso do núcleo de ferro, pode ser calculado com a fórmula indicada na fig. 234, isto é:

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= 7,8 \cdot S_{fe} (3 \cdot H + 4B + 6b_n) 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot 1038 (3 \cdot 90 + \\ &+ 4 \cdot 31 + 6 \cdot 41) 10^{-3} = \\ &= 5180 \text{ kg.} \end{aligned}$$

O comprimento da espira média do cobre, conforme parágrafo 83, pode ser obtido aproximadamente por:

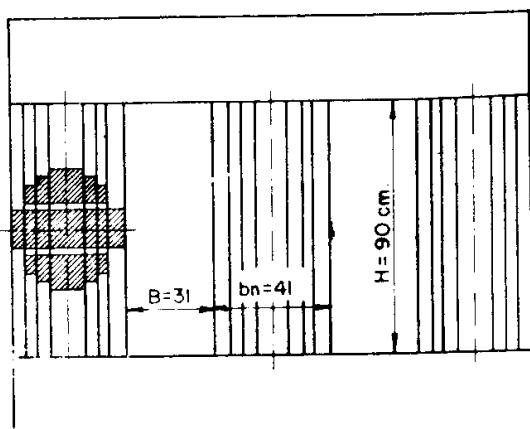


Fig. 248

$$l_{eu} = \pi [b_n + (B/2) \cdot 0,8] = \pi \left[41 + \frac{31}{2} \cdot 0,8 \right] = 167,7 \text{ cm} = 1,68 \text{ m.}$$

O peso do cobre é obtido por:

$$P_{eu} = 3 \cdot 8,9 \cdot 2 \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot l_{eu} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 8,9 \cdot 2 \cdot 466 \cdot 36 \cdot 1,68 \cdot 10^{-3} = \\ = 1500 \text{ kg.}$$

O valor aproximado das perdas resulta:

$$\text{No ferro } W_{Fe} = w_{Fe} \cdot P_{Fe} = 2,06 \cdot 5180 = 10\,670 \text{ watts.}$$

Os valores das perdas, obtidos pelo cálculo, são muito próximos dos valores estabelecidos no início do projeto, pelo que o cálculo do transformador pode prosseguir.

b) Enrolamento de baixa tensão

A altura da bobina B.T. deve ser igual à da bobina A.T. A distância mínima entre as cabeças das bobinas e as travessas, conforme parágrafo 76, deve ser:

$$l_1 = 1,3 \cdot kV = 1,3 \cdot 34,5 = 44,85 \text{ mm.}$$

Para obter-se maior segurança, esta distância é executada com 50 mm. A altura da bobina, expressa em centímetros, é:

$$b = H - 2 \cdot 5 = 90 - 10 = 80 \text{ cm.}$$

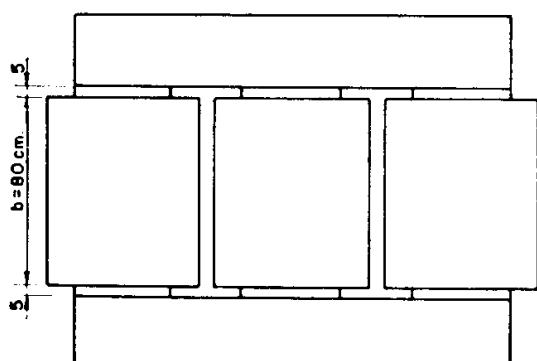


Fig. 249

O conjunto do núcleo com bobinas terá a disposição indicada na fig. 249. Devendo as bobinas B.T. serem ligadas em estrela, a tensão de fase é:

$$V_{f2} = \frac{7200}{\sqrt{3}} = 4162 \text{ volts.}$$

O número das espiras de cada bobina B.T. é:

$$N_2 = N_1 \frac{V_{f2}}{V_{f1}} = 466 \cdot \frac{4162}{17\,341} = 112 \text{ espiras}$$

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} = 96,3 \frac{466}{112} = \sim 400 \text{ A.}$$

Tendo a corrente valor elevado, o enrolamento B.T. é executado com 4 circuitos paralelos. Em cada circuito há:

$$\begin{aligned}
 10 \text{ bobinas com } 10 \text{ espiras} &= 100 \text{ espiras} \\
 2 \text{ bobinas com } 6 \text{ espiras} &= 12 \text{ espiras} \\
 \hline
 \text{Total} &= 112 \text{ espiras.}
 \end{aligned}$$

As duas bobinas de 6 espiras possuem isolamento reforçado e estão colocadas nas cabeças do enrolamento.

O enrolamento possui $(10 + 2) 4 = 48$ bobinas, das quais 40 com 10 espiras de isolamento normal e 8 com 6 espiras de isolamento reforçado. Para que o enrolamento seja de fácil execução, as bobinas são enroladas com dois condutores paralelos. Sendo a bobina constituída por 4 circuitos paralelos, e a densidade de corrente considerada $d_2 = 2,94 \text{ A/mm}^2$, a seção do condutor a ser usado é:

$$S'_2 = \frac{400}{2 \cdot 4 \cdot 2,94} = 17 \text{ mm}^2$$

Usa-se o condutor de $5,6 \times 3,1 \text{ mm}$, cuja seção pode ser considerada de 17 mm^2 , em virtude de o condutor possuir os cantos arredondados. O condutor é isolado com papel e sendo a tensão do enrolamento inferior a 15 kV , o acréscimo da espessura devido ao isolamento é de $0,6 \text{ mm}$, conforme parágrafo 76.

Devendo considerar-se de $0,1 \text{ mm}$ a folga entre um condutor e o adjacente, o comprimento da bobina é:

$$b_2 = 5 \cdot 2(3,1 + 0,6 + 0,1) = 38 \text{ mm.}$$

As duas camadas, de cada bobina, são isoladas entre si por um diafragma de prespann com a espessura de $0,4 \text{ mm}$. A altura da bobina, conforme fig. 250 é:

$$\begin{aligned}
 h_2 &= 2(5,6 + 0,6 + 0,1) + 0,4 = \\
 &= 13 \text{ mm.}
 \end{aligned}$$

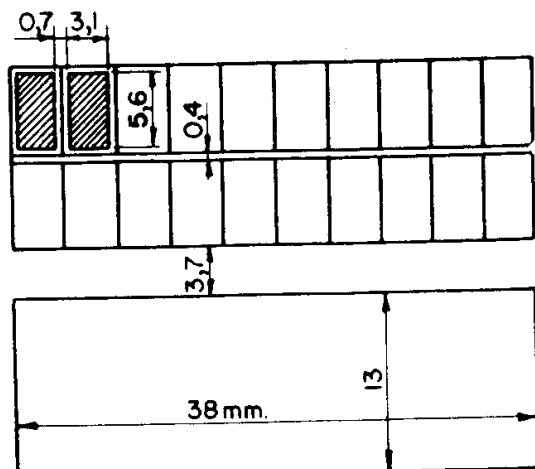


Fig. 250

Para as bobinas de cabeça, com 6 espiras, as dimensões do condutor devem ser escolhidas de maneira que o isolamento reforçado do mesmo permita obter a altura da bobina igual a 13 mm .

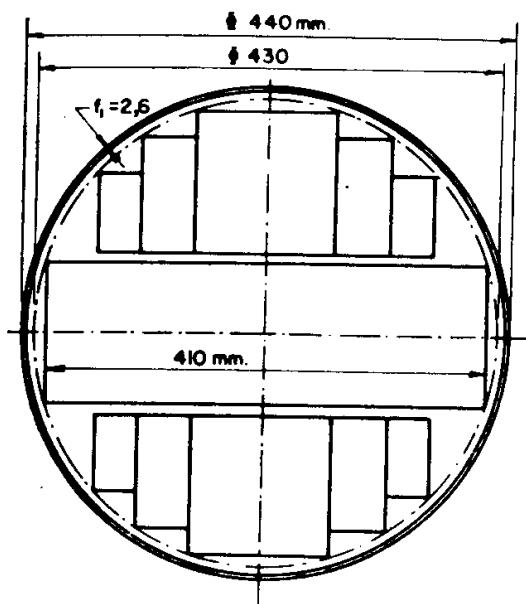


Fig. 251

As 48 bobinas estão colocadas uma sobre a outra, ficando entre elas o espaço livre

$$h_{12} = (800 - 48 \cdot 13) / 47 = \sim 3,7 \text{ mm.}$$

Entre o núcleo e os enrolamentos B.T. está interposto um tubo isolante cuja espessura, conforme parágrafo 76 é:

$$t_1 = \frac{kV}{10} = 2,6 \text{ mm.}$$

c) Enrolamento de alta tensão

O número das espiras por fase do enrolamento de alta tensão é $N_1 = 466$.

Estas espiras são distribuídas em 60 bobinas assim constituídas:

54 bobinas com 8 espiras = 432 espiras

6 bobinas com 6 espiras = 36 espiras

Total = 468 espiras.

As bobinas com 6 espiras possuem isolamento reforçado e estão colocadas nas cabeças do enrolamento.

No circuito A.T. a densidade de corrente é: $d_1 = 2,8 / 1,05 = 2,67 \text{ A/mm}^2$, resultando a seção do condutor de: $S_1 = 96,3 / 2,67 = 36 \text{ mm}^2$. Esta seção é realizada por meio de três condutores paralelos com $36/3 = 12 \text{ mm}^2$. Usa-se o condutor retangular $3,3 \times 3,7 \text{ mm}$.

Sendo a tensão de fase do circuito A.T. de 17 341 volts, o condutor é isolado com papel e, conforme parágrafo 76, o acréscimo da espessura devido ao isolamento é de 0,8 mm.

Devendo considerar-se de 0,1 mm a folga entre um condutor e o adjacente, o comprimento da bobina é:

$$b_1 = 4 \cdot 3 (3,3 + 0,8 + 0,1) = 50,6 \text{ mm.}$$

As duas camadas de cada bobina são separadas por um diafragma de prespann com a espessura de 0,5 mm. A altura da bobina, conforme fig. 252 é:

$$h_1 = 2 (3,7 + 0,8 + 0,1) + 0,5 = 9,7 \text{ mm.}$$

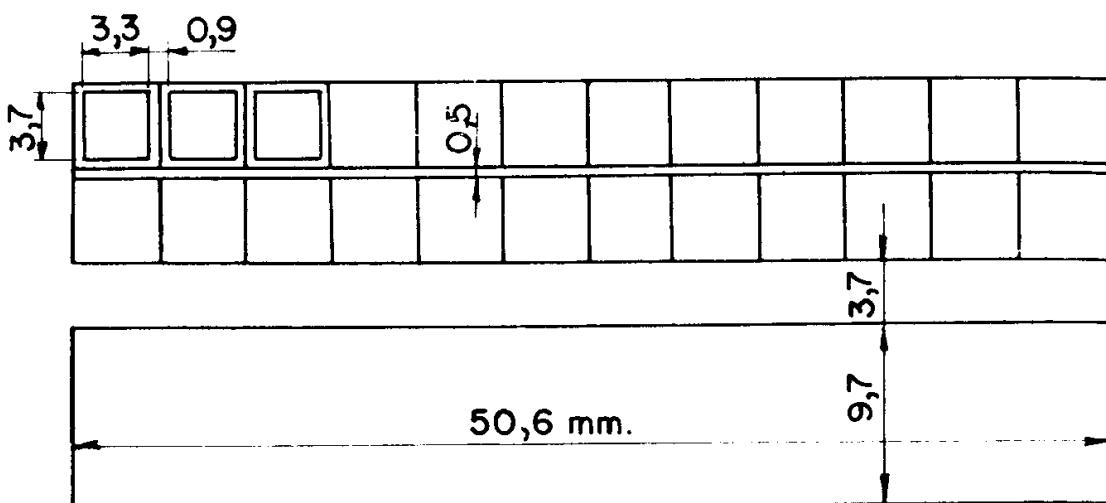


Fig. 252

Para as bobinas de cabeça, com 6 espiras, as dimensões do condutor devem ser escolhidas de forma que, com o isolamento reforçado, a altura das mesmas seja também de 9,7 mm.

As 60 bobinas são colocadas uma sobre a outra ficando entre elas o espaço livre:

$$h_1 = (800 - 60 \cdot 9,7) / 59 = 3,7 \text{ mm.}$$

d) *Disposição dos elementos na janela*

A distância entre o enrolamento B.T. e o A.T., conforme parágrafo 76, é dada por:

$$l_3 = 0,6 \cdot kV = 0,6 \cdot 34 = 20,4 \text{ mm} = \sim 20 \text{ mm.}$$

Entre o enrolamento A.T. e o B.T. está intercalado um tubo isolante cuja espessura, conforme parágrafo 76 é:

$$t_2 = \frac{kV (\text{Ensaio A.T.})}{10} = \frac{70}{10} = 7 \text{ mm.}$$

Com as dimensões calculadas, os elementos devem ser dispostos na janela conforme a fig. 253. A distância entre o enrolamento B.T. e a circunferência circunscrita ao núcleo é de 15 mm. O diâmetro interno da bobina B.T. é: $430 + 2 \cdot 15 = 460$ mm. Na zona central do núcleo, conforme fig. 253, a distância entre bobina B.T. e núcleo é:

$$l_o = (460 - 410) / 2 = 25 \text{ mm.}$$

A distância entre os dois circuitos A.T., na mesma janela é de:

$$l_{AT} = 310 - 2(25 + 38 + 20 + 50,6) = 43 \text{ mm.}$$

Esta medida é aceitável pois é maior que o dobro da distância que separa o enrolamento A.T. do B.T. da mesma fase.

e) *Cálculo das perdas, do peso das partes ativas e do rendimento*

Sendo o diâmetro interno do circuito B.T. de 460 mm, o comprimento da espira média deste circuito, conforme fig. 253 é dado por:

$$l_{cu2} = \pi (460 + 38) = 1564 \text{ mm} = 1,564 \text{ m.}$$

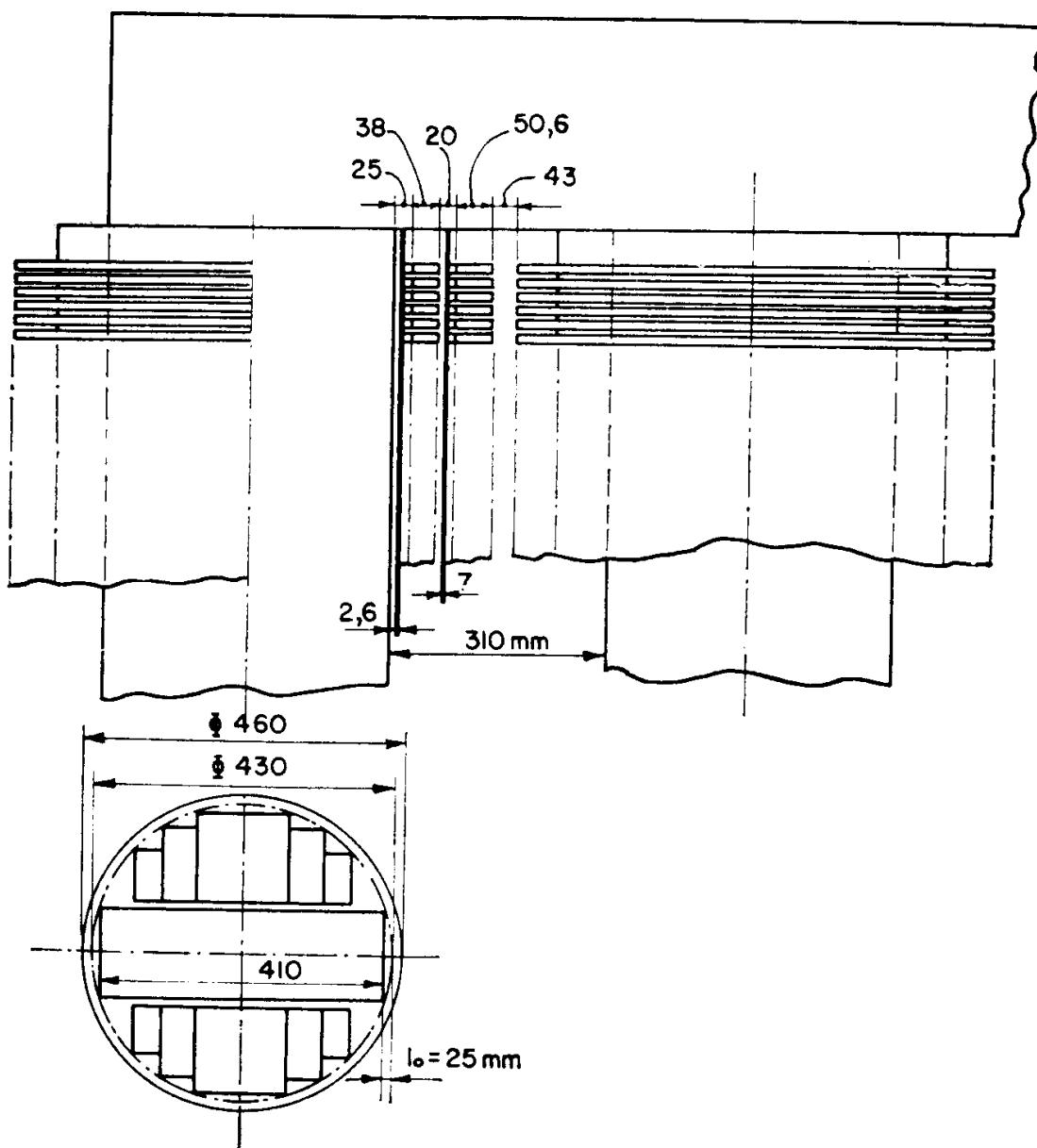


Fig. 253

O comprimento da espira média do circuito A.T. é dado por:

$$l_{cu1} = \pi (460 + 2.38 + 2.20 + 50,6) = 1968 \text{ mm} = 1,97 \text{ m.}$$

Peso do cobre das três bobinas B.T.:

$$P_{cu2} = 3.8,9.1_{cu2}.N_2.S_2.10^{-3} = 3.8,9.1,564.112.17.2.4.10^{-3} = 635 \text{ kg.}$$

Peso do cobre das três bobinas A.T.:

$$P_{cu1} = 3.8,9.1_{cu1}.N_1.S_1.10^{-3} = 3.8,9.1,97.464.36.10^{-3} = 880 \text{ kg.}$$

O peso do ferro foi anteriormente calculado, sendo: 5180 kg.

O peso das partes ativas é: $635 + 880 + 5180 = 6695 \text{ kg.}$

A tabela da fig. 221 avalia o peso das partes ativas em 6900 kg, valor próximo do calculado.

A resistência ôhmica, a 75° , dos dois circuitos é:

Enrolamento B.T.:

$$r_2 = \frac{\rho \cdot l_{cu2} \cdot N_2}{S_2} = \frac{0,0216 \cdot 1,564 \cdot 112}{17 \cdot 2 \cdot 4} = 0,0279 \text{ ohms/fase.}$$

Enrolamento A.T.:

$$r_1 = \frac{\rho \cdot l_{cu1} \cdot N_1}{S_1} = \frac{0,0216 \cdot 1,97 \cdot 464}{36} = 0,548 \text{ ohms/fase.}$$

Perda total no cobre:

$$\begin{aligned} W_{cu} &= 3(r_2 I_2^2 + r_1 I_1^2) = 3(0,0279 \cdot 400^2 + 0,548 \cdot 96,3^2) = \\ &= 3(4464 + 5064) = 28\,584 \text{ watts.} \end{aligned}$$

A perda no ferro já foi calculada, sendo: $W_{Fe} = 10\,670 \text{ watts.}$

Tanto as perdas no ferro, como as perdas no cobre, são maiores de aproximadamente 3% das indicadas na tabela da fig. 221. Como a referida diferença é pequena, os resultados podem ser considerados aceitáveis.

f) Rendimento

$$\mu = \frac{W_2}{W_2 + W_{Fe} + W_{cu}} = \frac{5000}{5000 + 10,67 + 28,58} = 0,99$$

g) *Tensão de curto-circuito ou tensão de impedância*

Resistência ôhmica equivalente do circuito A.T.

$$R'_e = r_1 + r_2 \cdot m^2 = 0,548 + 0,0279 \left(\frac{464}{112} \right)^2 = 0,548 + 0,47 = \sim 1,02 \text{ ohms}$$

A reatância de dispersão, referida ao circuito A.T., conforme parágrafo 20 é dada pela relação:

$$X'_e = 7,9 \frac{f \cdot l_{eu} \cdot N_1^2}{b} K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) 10^{-8}$$

f = freqüência (60 Hz)

l_{eu} = comprimento médio das espiras sendo:

$$\frac{l_{eu1} + l_{eu2}}{2} = \frac{197 + 156,4}{2} = 176,7 \text{ cm.}$$

N_1 = número das espiras do circuito A.T. = 464

b = altura axial da bobina = 80 cm

d = distância entre a bobina A.T. e a B.T. = 2 cm

a_1 = espessura da bobina A.T. = 5,06 cm

a_2 = espessura da bobina B.T. = 3,8 cm

K = fator de correção, sendo:

$$K = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2d + a_1 + a_2}{b} = 1 - \frac{2 \cdot 2 + 5,06 + 3,8}{2 \cdot \pi \cdot 80} = 0,97$$

Aplicando estes valores na fórmula da reatância de dispersão obtém-se:

$$X'_e = 7,9 \frac{60 \cdot 176,7 \cdot 464^2}{80} 0,97 \left(2 + \frac{5,06 + 3,8}{3} \right) 10^{-8} = 10,8 \text{ ohms}$$

Impedância por fase, referida ao circuito A.T.

$$Z'_e = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2} = \sqrt{1,02^2 + 10,8^2} = \sim 10,8 \text{ ohms}$$

Tensão de curto-circuito ou de impedância

$$V_{ce} = Z'_e \cdot I_1 = 10,8 \cdot 96,3 = 1040 \text{ volts}$$

$$\% V_{ce} = \frac{1040 \cdot 100}{17341} = 6\%$$

Este valor é igual ao indicado na fig. 221.

h) *Regulação ou queda de tensão industrial*

Calcula-se a queda de tensão industrial para os dois casos seguintes:

a) plena carga e $\cos\phi = 1$

b) plena carga e $\cos\phi = 0,8$

$$\% \epsilon = c \left[\% R \cdot I \cdot \cos\phi + \% X \cdot I \cdot \sin\phi + \frac{(\% I \cdot X \cdot \cos\phi - \% I \cdot R \cdot \sin\phi)^2}{200} \right]$$

$$\% I \cdot R = \frac{W_{eu} \cdot 100}{W_2} = \frac{28\,584 \cdot 100}{5\,000\,000} = 0,571$$

$$\% I \cdot X = \sqrt{(\% I \cdot Z)^2 - (\% I \cdot R)^2} = \sqrt{6^2 - 0,571^2} = 5,96$$

No primeiro caso: $c = 1$; $\cos\phi = 1$; $\sin\phi = 0$

$$\% \epsilon = 0,571 + \frac{5,96^2}{200} = 0,749$$

No segundo caso: $c = 1$; $\cos\phi = 0,8$; $\sin\phi = 0,6$

$$\% \epsilon = 0,571 \cdot 0,8 + 5,96 \cdot 0,6 + \frac{(5,96 \cdot 0,8 - 0,571 \cdot 0,6)^2}{200} = 4,12$$

i) *Tanque*

O transformador, conforme foi calculado, possui as dimensões indicadas na fig. 254.

Ao se projetar o tanque é preciso lembrar que a distância entre os enrolamentos e as paredes seja suficiente para garantir o isolamento.

O isolamento está garantido se as distâncias que separam os enrolamentos e as paredes são as mesmas que separam os dois enrolamentos de alta tensão existentes na mesma janela.

No transformador em questão a mencionada distância é de aproximadamente 5 cm. Nestas condições um tanque retangular de 2300×800 seria suficiente. Entretanto prefere-se fazer o tanque de 2350×1000 , pois é preciso ter em consideração que as ligações entre bobinas e isoladores também devem ter espaço que lhes garanta a isolação.

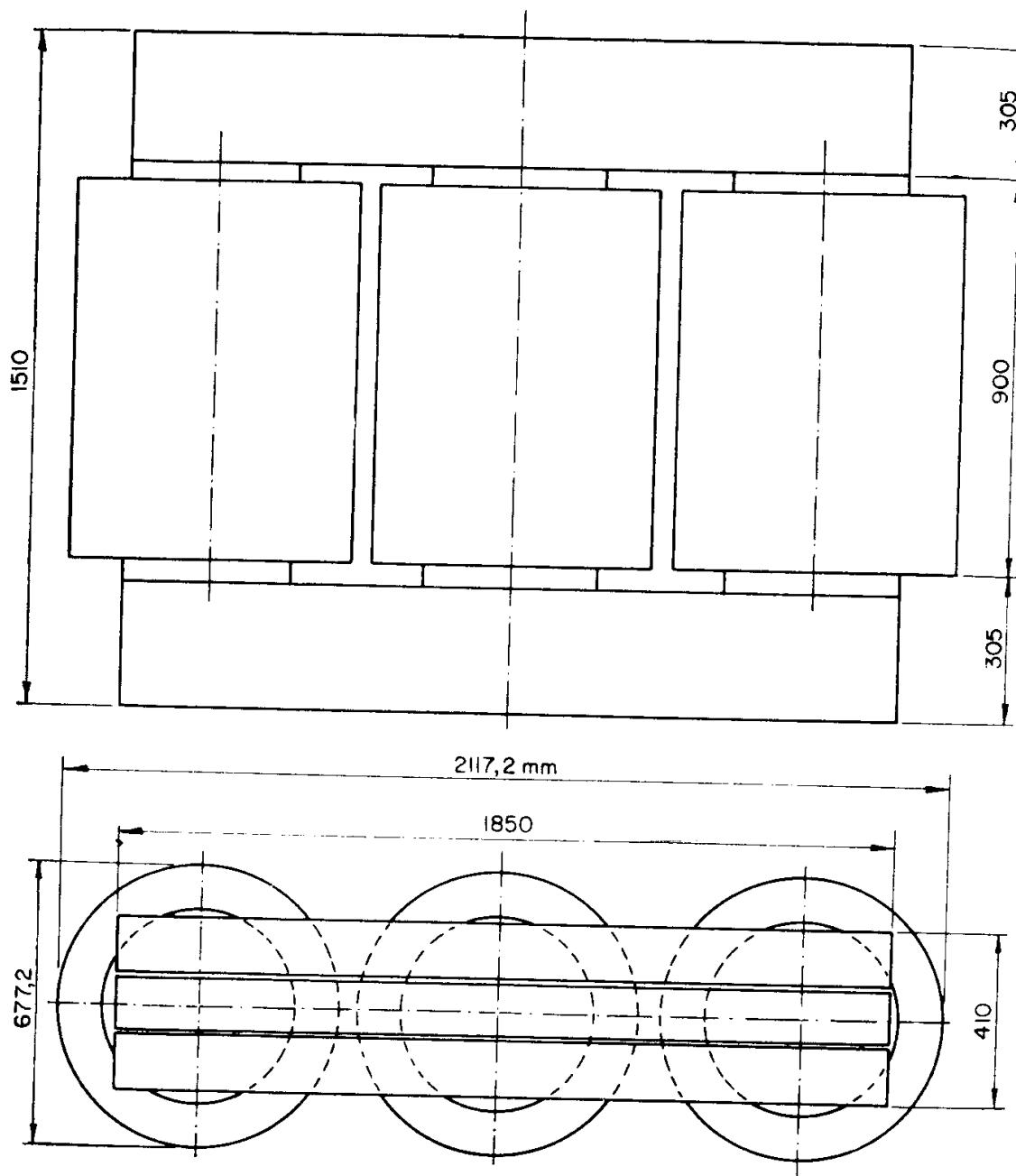


Fig. 254

O valor da altura do tanque deve ser de 1,5 a altura do núcleo. No caso em questão, a altura do tanque deve ser $1510 \cdot 1,5 = 2265$ mm.

Usando o tanque indicado na fig. 255, avalia-se a elevação de temperatura do óleo isolante. Tendo o tanque o conservador de óleo, a superfície de irradiação do calor é calculada com base na altura eficaz.

$$H_{ef} = 1600 \text{ mm.}$$

Sendo o passo das ondulações de 45 mm, é possível colocar 48 no sentido do comprimento e 19 no sentido da largura.

O número total de ondulações é:
 $(48 + 19) \cdot 2 = 134$.

Nos tanques destinados a transformadores de potência superior a 1000 kVA, onde os canais de resfriamento possuem altura muito grande em comparação à largura (no caso da fig. 255 altura = 350 e largura = 30), considera-se somente uma das paredes como superfície transmissora de calor.

Perímetro do tanque:

$$P = 2 \cdot 2350 + 2 \cdot 1000 + 134 \cdot 350 = \\ = 53\,600 \text{ mm} = 53,6 \text{ m.}$$

Superfície de transmissão:

$$S_{tr} = 53,6 \cdot 1,6 = 85,76 \text{ m}^2.$$

As perdas totais do transformador são $W_{fe} + W_{cu} = 39\,254$ watts. Por razão de segurança são acrescidas de 10%, resultando $W_t = 43\,200$ w.

A elevação de temperatura da parede do tanque, conforme o parágrafo 88 é:

$$\Delta t = \frac{W_t}{S_{tr} \cdot K} = \frac{43\,200}{85,76 \cdot 12} = 42^\circ\text{C}$$

A elevação de temperatura do óleo é $\Delta t_o = 42 + 5 = 47^\circ\text{C}$, valor aceitável conforme a tabela da fig. 191.

O transformador pode, entretanto, ser fabricado com um tanque provido de refrigeradores tubulares, conforme a fig. 256. Colocando quatro ventiladores, a fim de aumentar a eficiência dos radiadores, o transformador pode fornecer a potência de 6250 kVA.

94) PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 30 kVA EM ÓLEO

As características do transformador são: potência = 30 kVA; freqüência = 60 Hz; alta tensão $V_1 = 12\,000$ volts; baixa tensão $V_2 = 220$ volts; ligação das fases A.T. e B.T. em estrela; núcleos envolvidos com enrolamentos cilíndricos.

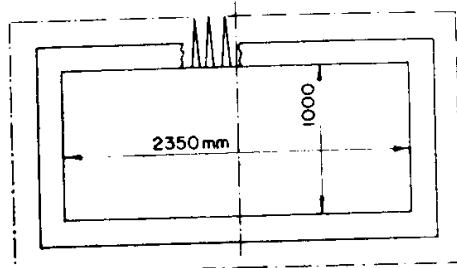
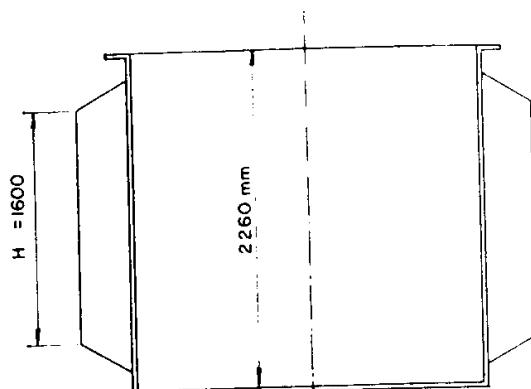


Fig. 255

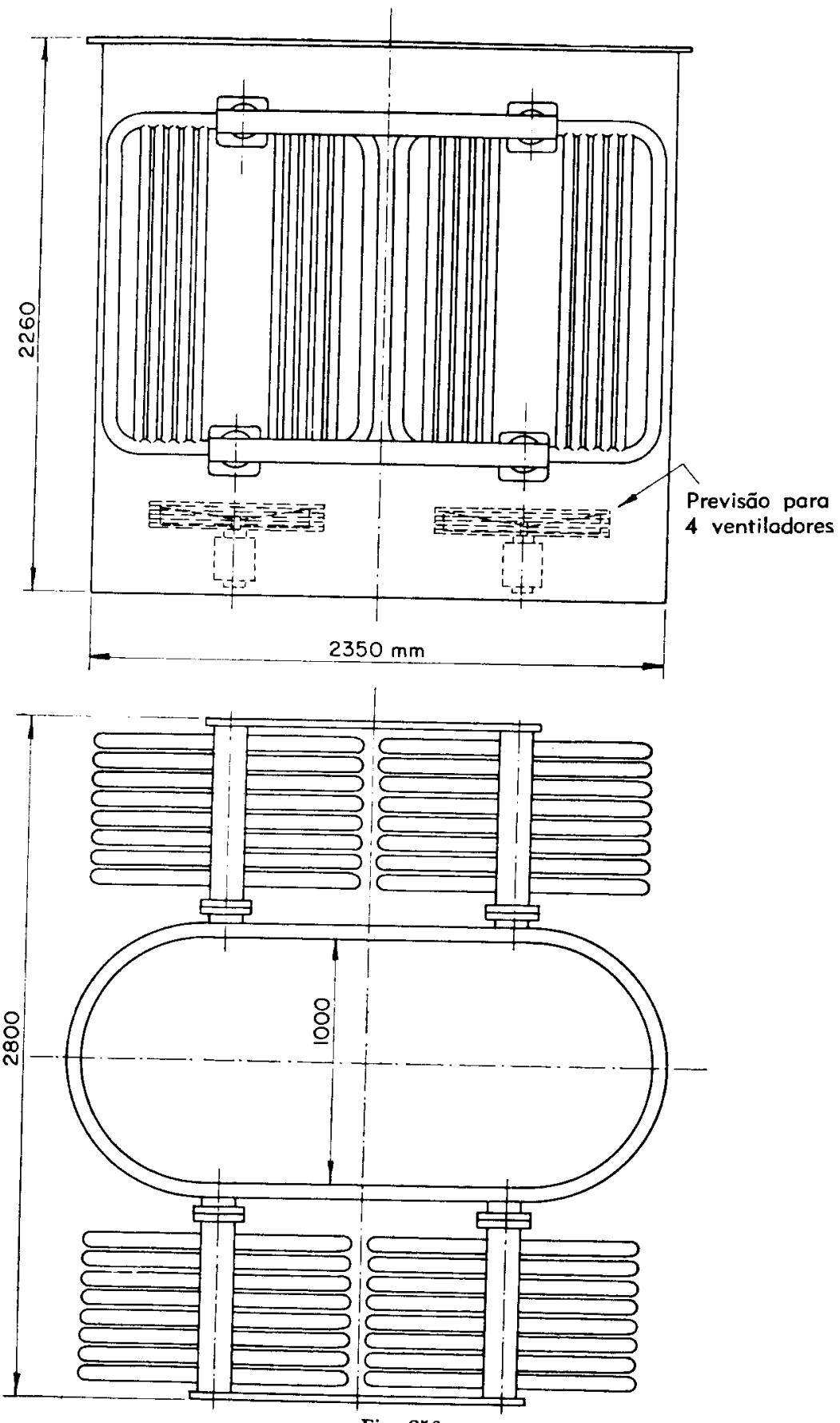


Fig. 256

O resfriamento é feito com óleo e ventilação natural. O projeto do transformador obedece ao esquema seguinte:

a) *Perdas e cálculo do núcleo*

Da tabela da fig. 215 obtém-se: perdas no ferro $W_{Fe} = 210$ watts; perdas no cobre $W_{cu} = 570$ watts.

A densidade média de corrente, para os dois enrolamentos, conforme a fig. 222, pode ser considerada $d_m = 2,3 \text{ A/mm}^2$ e portanto a perda específica no cobre, conforme parágrafo 23, é: $w_{cu} = 2,43 \cdot d^2 = 2,43 \cdot 2,3^2 = 12,85 \text{ W/kg}$.

Para o núcleo empregam-se chapas Armco, bitola n.º 29, isto é, com 0,356 mm de espessura, tipo M 14, que conforme a tabela da fig. 24 apresentam para $B_M = 10\ 000$, a perda específica $w_{Fe-10} = 1,14 \text{ W/kg}$.

Escolhendo para a indução máxima no núcleo, conforme parágrafo 78, o valor $B_M = 11\ 000$ gauss, a perda específica no ferro é:

$$w_{Fe} = w_{Fe-10} \left(\frac{B_M}{10\ 000} \right)^2 = 1,14 \left(\frac{11\ 000}{10\ 000} \right)^2 = 1,38 \text{ W/kg.}$$

Da tabela da fig. 223 obtém-se $C = 38$, podendo-se calcular a seção do núcleo conforme parágrafo 80.

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{W_2 \frac{w_{cu}}{10^5}}{f \frac{W_{cu}}{W_{Fe}} d \cdot B_M}} = 38 \sqrt{\frac{12,85}{\frac{30}{60} \frac{1,38}{570} \frac{10^5}{2,3 \cdot 11\ 000}}} = \sim 99 \text{ cm}^2$$

Com as lâminas usadas o coeficiente de enchimento é 0,87, resultando a superfície geométrica do núcleo:

$$S'_{Fe} = \frac{99}{0,87} = 114 \text{ cm}^2$$

O núcleo é feito em forma de cruz, conforme fig. 257. A seção geométrica do núcleo, com as dimensões indicadas na fig. 257, é:

$$S'_{Fe} = 2 \cdot 2,5 \cdot 7 + 7 \cdot 12 = 35 + 84 = 119 \text{ cm}^2.$$

A seção magnética do núcleo é:

$$S_{Fe} = 119 \cdot 0,87 = 103 \text{ cm}^2.$$

A seção das travessas é retangular, conforme fig. 258. A altura das travessas é:

$$h = \frac{119}{12} = \sim 10 \text{ cm.}$$

Sendo a seção magnética do núcleo $S_{Fe} = 103 \text{ cm}^2$ e $B_M = 11\,000 \text{ gauss}$, o fluxo máximo no núcleo é:

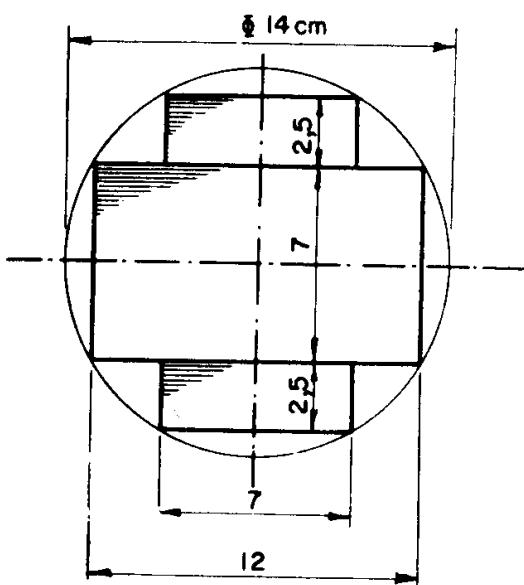


Fig. 257

$$\phi_M = S_{Fe} \cdot B_M = 103 \cdot 11\,000 = \\ = 1133 \cdot 10^3 \text{ maxwell.}$$

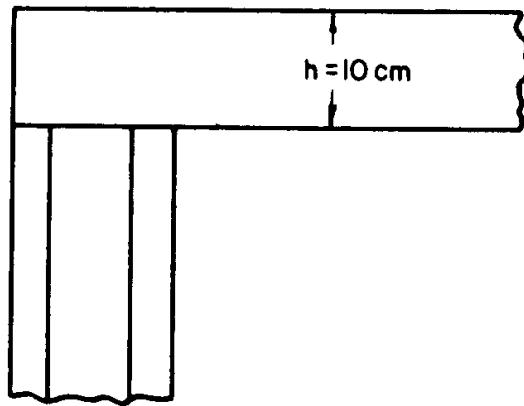


Fig. 258

Sendo o circuito A.T. conectado em estrela, a tensão de fase do mesmo é:

$$V_{ri} = \frac{12\,000}{\sqrt{3}} = \sim 6950 \text{ volts.}$$

Número de espiras do enrolamento A.T.:

$$N_1 = \frac{V_{ri} \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \phi_M} = \frac{6950 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \cdot 1133 \cdot 10^3} = \sim 2300 \text{ espiras.}$$

Em correspondência da potência nominal o enrolamento A.T. fornece a corrente:

$$I_1 = \frac{W_2 \cdot 10^3}{3 \cdot V_{ri}} = \frac{30 \cdot 1000}{3 \cdot 6950} = 1,44 \text{ A.}$$

Tendo sido escolhida a densidade média $d = 2,3 \text{ A/mm}^2$, no circuito B.T., que é o mais curto, $d_2 = 2,3 \cdot 1,05 = 2,41 \text{ A/mm}^2$ e no circuito A.T., $d_1 = 2,3/1,05 = 2,19 \text{ A/mm}^2$.

Seção do condutor do circuito A.T.:

$$S_1 = \frac{I_1}{d_1} = \frac{1,44}{2,19} = 0,66 \text{ mm}^2$$

Usa-se fio esmaltado tipo "Formex" n.º 19 (AWG), cuja seção é $0,65 \text{ mm}^2$.

Da tabela da fig. 225, à potência de 30 kVA corresponde $A = \sim 260$ Ampère-espiras por centímetro. O número de Ampère-espiras totais de cada coluna é:

$$2 N_1 \cdot I_1 = 2 \cdot 2300 \cdot 1,44 = 6624.$$

$$\text{Altura da janela: } H = \frac{2 \cdot N_1 \cdot I_1}{A} = \frac{6624}{260} = \sim 25 \text{ cm.}$$

Sendo o transformador de núcleo envolvido, a seção aproximada do cobre na janela é:

$$S_{cu} = 2 (2 \cdot N_1 \cdot S_1) = 2 \cdot 2300 \cdot 0,65 = \sim 6000 \text{ mm}^2$$

Da tabela da fig. 229 obtém-se o valor do fator de enchimento $f_{cu} = 0,20$.

$$\text{Largura da janela: } B = \frac{S_{cu}}{100 \cdot f_{cu} \cdot H} = \frac{6000}{100 \cdot 0,2 \cdot 25} = 12. \text{ Executa-se}$$

com $B = 12,5 \text{ cm}$.

Com as medidas calculadas, o núcleo possui a forma indicada na fig. 259. O peso do núcleo é calculado com a fórmula indicada na fig. 234, isto é:

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= 7,8 \cdot S_{Fe} (3 \cdot H + 4 \cdot B + 6 \cdot b_n) \\ &= 7,8 \cdot 103 (3 \cdot 25 + 4 \cdot 12,5 + 6 \cdot 12) 10^{-3} = \\ &= 158 \text{ kg.} \end{aligned}$$

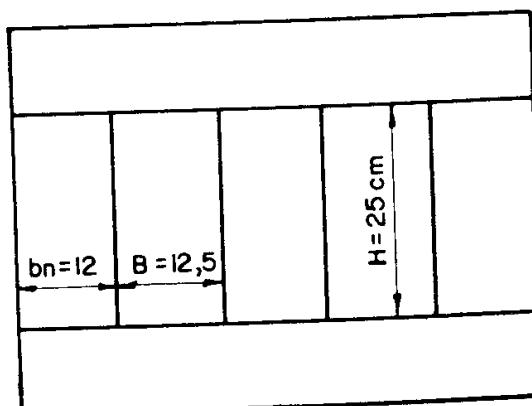


Fig. 259

O comprimento da espira média do cobre, conforme parágrafo 83, é obtido aproximadamente pela fórmula:

$$l_{cu} = \pi [b_n + (B/2) 0,8] = \pi [12 + (12,5/2) 0,8] = 53,4 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso do cobre: } P_{cu} &= 3 \cdot 8,9 \cdot 2 \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot l_{cu} \cdot 10^{-3} = \\ &= 3 \cdot 8,9 \cdot 2 \cdot 2300 \cdot 0,65 \cdot 53,4 \cdot 10^{-3} = 42,6 \text{ kg.}\end{aligned}$$

Perdas no ferro: $W_{Fe} = w_{Fe} \cdot P_{Fe} = 1,38 \cdot 158 = 218$ watts.

Perdas aproximadas no cobre: $W_{cu} = w_{cu} \cdot P_{cu} = 12,85 \cdot 42,6 = 547$ watts.

Os valores calculados são muito próximos dos fornecidos pela tabela da fig. 215, pelo que o cálculo do transformador pode continuar.

b) Enrolamento de baixa tensão

A bobina B.T. deve ter altura igual à da bobina A.T. A distância mínima entre a cabeça das bobinas e as travessas, conforme parágrafo 76, deve ser:

$$l_1 = 1,3 \cdot kV = 1,3 \cdot 15 = 19,5 \text{ mm} = \sim 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}$$

A altura das bobinas será portanto de:

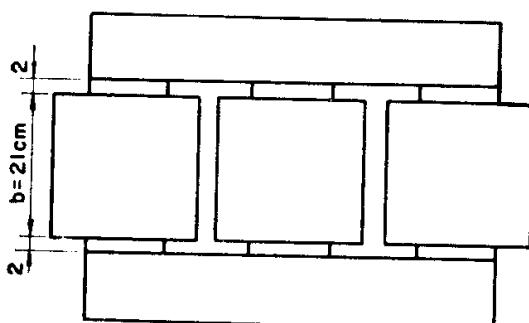


Fig. 260

$$b = H - 2 \cdot l_1 = 25 - 4 = 21 \text{ cm.}$$

O conjunto núcleo e bobinas terá a disposição indicada na fig. 260. Sendo as bobinas B.T. ligadas em estrela, a tensão de fase é:

$$V_{f2} = \frac{220}{\sqrt{3}} = \sim 127 \text{ volts.}$$

O número de espiras de cada bobina B.T. é:

$$N_2 = N_1 \frac{V_{f2}}{V_{f1}} = 2300 \frac{127}{6950} = 42 \text{ espiras.}$$

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} = 1,44 \frac{2300}{42} = \sim 79 \text{ A.}$$

A densidade de corrente no circuito B.T. possui o valor $d_2 = 2,41 \text{ A/mm}^2$ e portanto a seção do condutor desse circuito é:

$$S_2 = \frac{I_2}{d_2} = \frac{79}{2,41} = 32,8 \text{ mm}^2$$

Tendo a seção valor elevado, usam-se dois condutores paralelos. Estes condutores, cada um com dimensões $4,5 \times 3,7 \text{ mm}$, são dispostos um ao

lado do outro, conforme fig. 261. O isolamento dos condutores tem a espessura de 0,2 mm e a folga entre os condutores adjacentes deve ser considerada 0,1 mm.

A altura da bobina é: $b_2 = 42 (4,5 + 0,4 + 0,1) = 210 \text{ mm}$.

A altura calculada corresponde ao espaço livre existente na janela.

A espessura da bobina B.T. é: $h_2 = 2 (3,7 + 0,4 + 0,1) = 8,4 \text{ mm}$, conforme fig. 261.

c) Enrolamento de alta tensão

O enrolamento A.T. é executado com 7 bobinas, ligadas em série, enroladas com fio esmaltado tipo "Formex", com as espiras assim distribuídas:

5 bobinas com 360 espiras = 1800 espiras

2 bobinas com 250 espiras = 500 espiras

Total = 2300 espiras.

As duas bobinas com 250 espiras possuem isolamento reforçado e estão colocadas nas cabeças do enrolamento. As 5 bobinas internas são enroladas em duas seções, conforme fig. 263.

Cada camada tem 24 espiras (12 em cada seção). O isolamento das duas seções é feito com diafragma de prespann cuja espessura é de 0,4 mm.

O diâmetro do condutor sem isolamento é de 0,91 mm. e com isolamento é de: $0,91 + 0,15 = 1,06 \text{ mm}$.

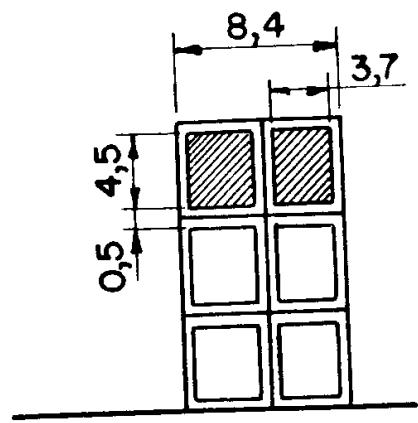


Fig. 261

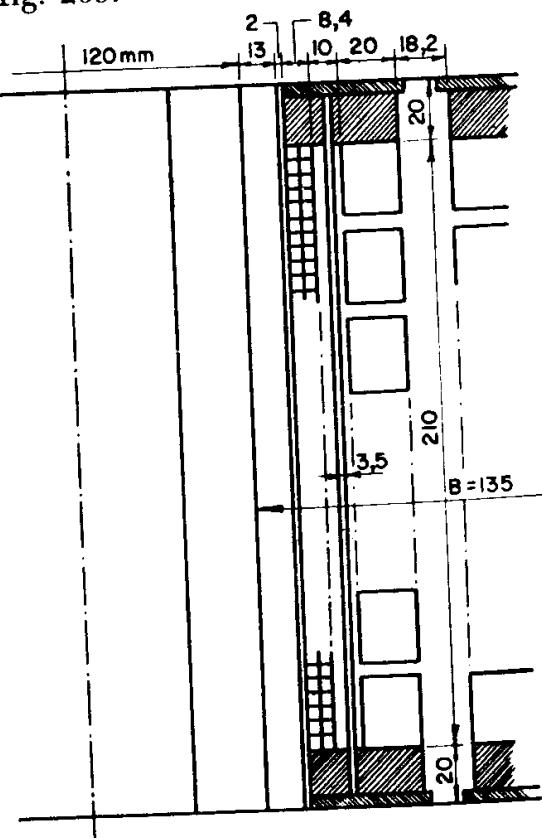


Fig. 262

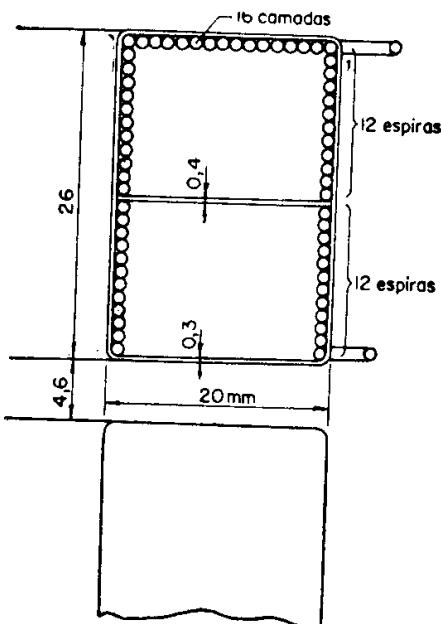


Fig. 263

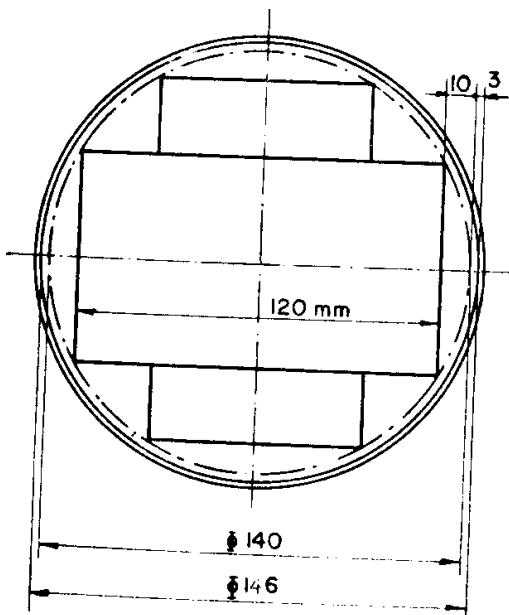


Fig. 264

A distância entre a bobina B.T. e a A.T., conforme parágrafo 76 é:

$$l_3 = 0,6 \cdot kV = 0,6 \cdot 12 = 7,2 \text{ mm.}$$

A fim de permitir que o óleo circule livremente entre as bobinas A.T. e B.T., as duas são distanciadas de 10 mm. Assim sendo $l_3 = 10 \text{ mm}$. Entre a bobina B.T. e a A.T. interpõe-se um cilindro de material isolante cuja espessura, conforme parágrafo 76, é

O isolamento entre uma camada e a outra é feito com papel isolante cuja espessura é de 0,1 mm.

A espessura do isolamento externo, feito com cadarço, pode ser considerada de 0,3 mm.

$$\text{Altura da bobina } h_1 = 24 \cdot 1,06 + 0,4 + 2 \cdot 0,3 = 26 \text{ mm.}$$

Largura da bobina:

$$l_1 = 16 \cdot 1,06 + 15 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,3 = \approx 20 \text{ mm.}$$

As duas bobinas, com 250 espiras e isolamento reforçado, devem possuir as mesmas dimensões das bobinas internas.

As sete bobinas estão colocadas uma sobre a outra, ficando entre elas o espaço livre:

$$h_{11} = (210 - 26 \cdot 7) / 6 = 4,6 \text{ mm.}$$

d) *Disposição dos elementos na janela*

O enrolamento B.T. é enrolado sobre um cilindro de material isolante com a espessura de 2 mm. Sendo o diâmetro da circunferência circunscrita ao núcleo de $\phi = 140 \text{ mm}$, o diâmetro interno do cilindro isolante deve ser de: $\phi_1 = 146 \text{ mm}$.

Na zona central da janela, a distância entre o núcleo e o enrolamento B.T. é, conforme fig. 264, de:

$$l_o = 10 + 3 = 13 \text{ mm.}$$

$$t_2 = \frac{kV \text{ (Ensaio A.T.)}}{10} = \frac{34}{10} = 3,4 \text{ mm} = \sim 3,5 \text{ mm}$$

A distância que separa as duas bobinas A.T., na mesma janela é:

$$1 \text{ A.T.} = 125 - 2(10 + 3 + 2 + 8,4 + 10 + 20) = 18,2 \text{ mm}$$

Esta distância é aceitável pois é maior que o dobro da distância que separa as bobinas A.T. e B.T. da mesma fase.

A disposição dos elementos na janela está indicada na fig. 262.

e) *Cálculo das perdas, do peso das partes ativas e do rendimento*

O diâmetro interno do cilindro isolante, sobre o qual está enrolado o circuito B.T. é de 146 mm, assim sendo, o diâmetro médio do circuito B.T. é $146 + 4 + 8,4 = 158,4$ mm.

Comprimento da espira média da bobina B.T.:

$$l_{cu2} = \pi \cdot 158,4 = 497 \text{ mm} = 0,497 \text{ m}$$

Comprimento da espira média da bobina A.T.:

$$\begin{aligned} l_{cu1} &= \pi \cdot (146 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 8,4 + 2 \cdot 10 + 20) = \\ &= \pi \cdot 206,8 = \sim 650 \text{ mm} = 0,65 \text{ m} \end{aligned}$$

Peso do cobre das três bobinas B.T.:

$$\begin{aligned} P_{cu2} &= 3 \cdot 8,9 \cdot l_{cu2} \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 8,9 \cdot 0,497 \cdot 42 \cdot 32,8 \cdot 10^{-3} = \\ &= 18,25 \text{ kg} \end{aligned}$$

Peso do cobre das três bobinas A.T.:

$$\begin{aligned} P_{cu1} &= 3 \cdot 8,9 \cdot l_{cu1} \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 8,9 \cdot 0,65 \cdot 2300 \cdot 0,65 \cdot 10^{-3} = \\ &= 26 \text{ kg} \end{aligned}$$

A resistência ôhmica das bobinas a 75°C é:

$$\text{Bobina B.T.; } r_2 = \frac{\rho \cdot l_{cu2} \cdot N_2}{S_2} = \frac{0,0216 \cdot 0,497 \cdot 42}{32,8} = 0,0137 \text{ ohms}$$

$$\text{Bobina A.T.; } r_1 = \frac{\rho \cdot l_{cu1} \cdot N_1}{S_1} = \frac{0,0216 \cdot 0,65 \cdot 2300}{0,65} = 49,7 \text{ ohms}$$

Perdas no cobre:

$$W_{cu} = 3(r_1 \cdot I_1^2 + r_2 \cdot I_2^2) = 3(49,7 \cdot 1,44^2 + 0,0137 \cdot 79^2) = 566 \text{ watts}$$

As perdas no ferro já foram calculadas, sendo seu valor:
 $W_{fe} = 218 \text{ watts.}$

Os valores calculados são próximos dos indicados na tabela da fig. 215.

$$\text{Rendimento: } \mu = \frac{W_2}{W_2 + W_{fe} W_{cu}} = \frac{30}{30 + 0,218 + 0,566} = 0,975.$$

Este valor coincide com o indicado pela tabela da fig. 215.

f) *Tensão de curto-circuito ou tensão de impedância*

Resistência equivalente do circuito A.T.

$$R'_e = r_1 + r_2 \cdot m^2 = 49,7 + 0,0137 \left(\frac{2300}{42} \right)^2 = 49,7 + 41 = 90,7 \text{ ohms}$$

A reatância de dispersão referida ao circuito A.T., conforme parágrafo 20 é dada por:

$$X'_e = 7,9 \frac{f \cdot l_{eu} \cdot N_1^2}{b} \cdot K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) 10^{-8}, \text{ onde:}$$

f = freqüência = 60 Hz

$$l_{eu} = \text{comprimento médio das espiras} = \frac{l_{eu1} + l_{eu2}}{2} = \frac{65 + 49,7}{2} = 57,4 \text{ cm}$$

N_1 = número das espiras da bobina A.T. = 2300

b = altura axial das bobinas = 21 cm

d = distância entre as bobinas B.T. e A.T. = 1 cm

a_1 = espessura da bobina A.T. = 2 cm

a_2 = espessura da bobina B.T. = 0,84 cm

K = fator de correção, sendo:

$$K = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2d + a_1 + a_2}{b} = 1 - \frac{2 + 2 + 0,84}{2 \cdot \pi \cdot 21} = 0,963$$

Substituindo os valores acima indicados, na fórmula da reatância equivalente do circuito A.T., obtém-se:

$$X'_e = 7,9 \frac{60 \cdot 57,4 \cdot 2300^2}{21} \cdot 0,963 \cdot (1 + \frac{2 + 0,84}{3}) = 128 \text{ ohms.}$$

Impedância referida ao circuito A.T.:

$$Z'_e = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2} = \sqrt{90,7^2 + 128^2} = \sim 157 \text{ ohms.}$$

Tensão de curto-circuito ou de impedância

$$V_{cc} = Z'_e \cdot I_1 = 157 \cdot 1,44 = 226 \text{ volts.}$$

$$\% V_{cc} = \frac{226 \cdot 100}{6950} = \sim 3,25$$

Este valor é próximo do indicado na tabela da fig. 215.

g) *Regulação ou queda de tensão industrial*

Calcula-se a queda de tensão industrial para os dois casos seguintes:

- a) plena carga e $\cos\phi = 1$
- b) plena carga e $\cos\phi = 0,8$

$$\% \epsilon = c \left[\% RI \cdot \cos\phi + \% XI \cdot \sin\phi + \frac{(\% XI \cos\phi - \% RI \sin\phi)^2}{200} \right]$$

$$\% RI = \frac{W_{eu} \cdot 100}{W_2} = \frac{566 \cdot 100}{30\,000} = 1,88$$

$$\% XI = \sqrt{(\% ZI)^2 - (\% RI)^2} = \sqrt{3,25^2 - 1,88^2} = \sim 2,65$$

No primeiro caso: $c = 1$; $\cos\phi = 1$; $\sin\phi = 0$

$$\% \epsilon = 1,88 + \frac{2,65^2}{200} = 1,91$$

No segundo caso: $c = 1$; $\cos\phi = 0,8$; $\sin\phi = 0,6$

$$\% \epsilon = 1,88 \cdot 0,8 + 2,65 \cdot 0,6 + \frac{(2,65 \cdot 0,8 - 1,88 \cdot 0,6)^2}{200} = \sim 3,1$$

Os valores calculados são muito próximos dos indicados pela tabela da fig. 215.

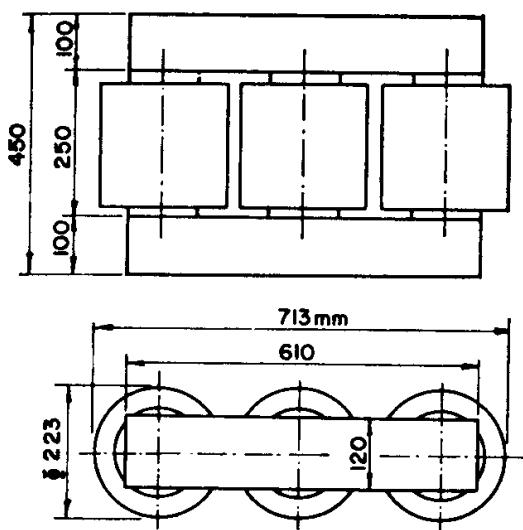


Fig. 265

Nas condições expostas, um tanque retangular de 755×260 mm seria suficiente.

Prefere-se, entretanto, executar o tanque com 760×300 mm.

O valor da altura do tanque deve corresponder a 1,5 vezes a altura do núcleo do transformador. No caso em questão a altura do tanque deve ser de $450 \times 1,5 = 670$ mm.

O tanque terá conservador de óleo e as dimensões indicadas na fig. 266.

Superfície de irradiação: $S_t = 2 (0,76 + 0,30) 0,67 = 1,42 \text{ m}^2$.

Perdas totais:

$$W_{fe} + W_{cu} = 218 + 566 = \\ = 784 \text{ watts.}$$

A elevação da temperatura da superfície do tanque, conforme parágrafo 88 é:

$$\Delta_t = \frac{W_t}{S_{tr} \cdot K} = \frac{784}{1,42 \cdot 12} = 46^\circ \text{C}$$

Sendo a diferença de temperatura entre o óleo e a chapa do tanque de aproximadamente 5°C , a elevação de temperatura do óleo é:

$$\Delta t_o = 46 + 5 = 51^\circ\text{C}.$$

Este valor é aceitável, conforme a tabela da fig. 191.

h) Tanque

O transformador calculado possui as dimensões indicadas na fig. 265. O tanque deve ser projetado tendo presente que a distância entre os enrolamentos e as paredes deve ser suficiente para garantir o isolamento.

O isolamento está garantido se a distância entre as paredes do tanque e os enrolamentos é pelo menos igual à que separa as duas bobinas de alta tensão na mesma janela.

No transformador em questão a referida distância é de 17,1 mm.

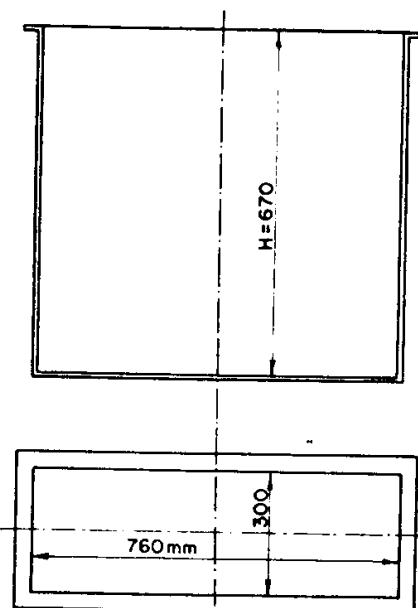


Fig. 266

95) TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Os transformadores monofásicos de distribuição podem ser utilizados separadamente ou agrupados, a fim de formar os chamados bancos trifásicos.

Na formação dos bancos trifásicos, por meio de transformadores monofásicos, é preciso que estes possuam:

- 1 — A mesma potência
- 2 — A mesma tensão, tanto do lado A.T. como do lado B.T.
- 3 — A mesma impedância.

O agrupamento ilustrado na fig. 267, com os circuitos de alta e baixa tensão agrupados em triângulo, apresenta o deslocamento angular de 0°

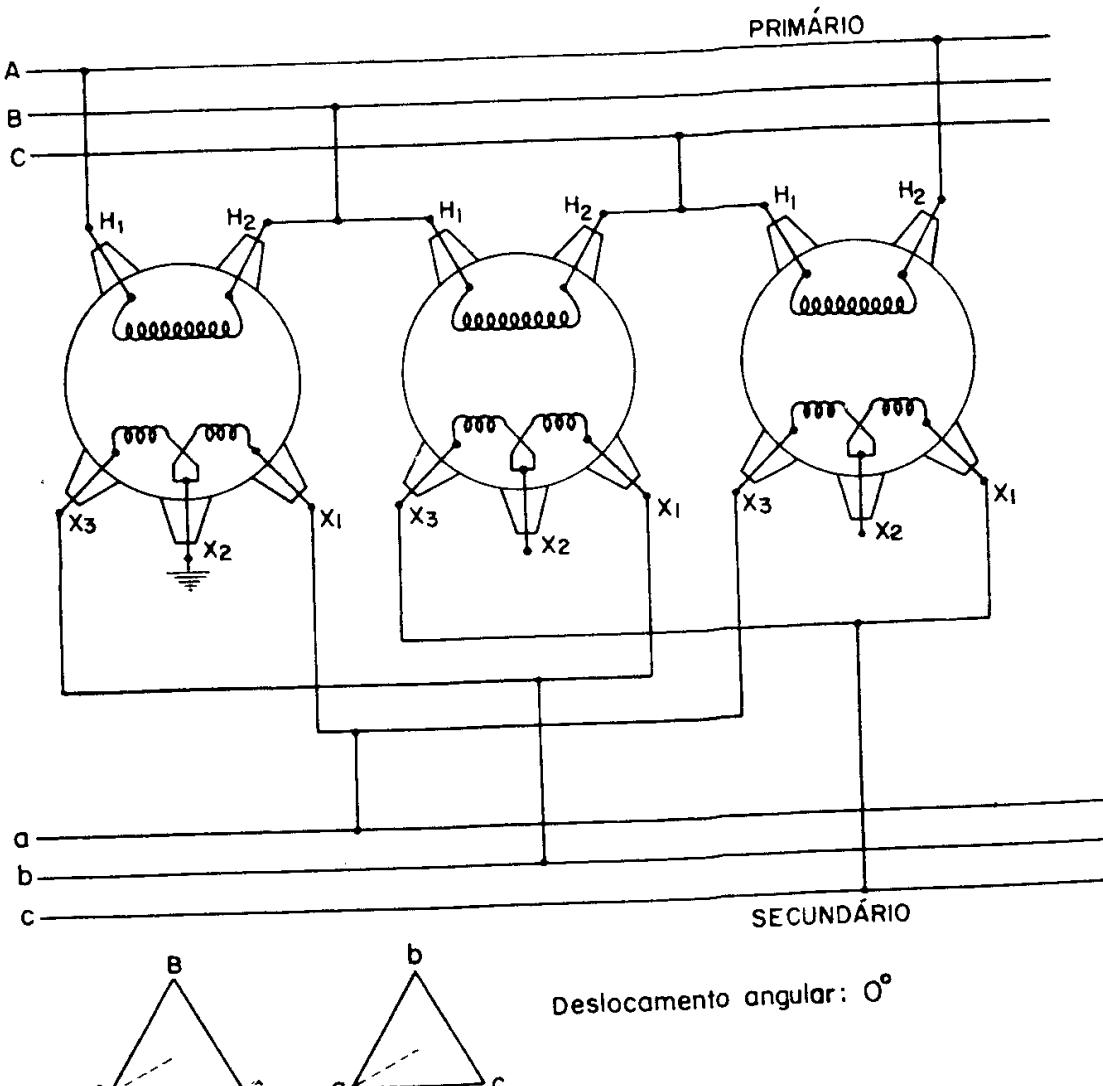


Fig. 267

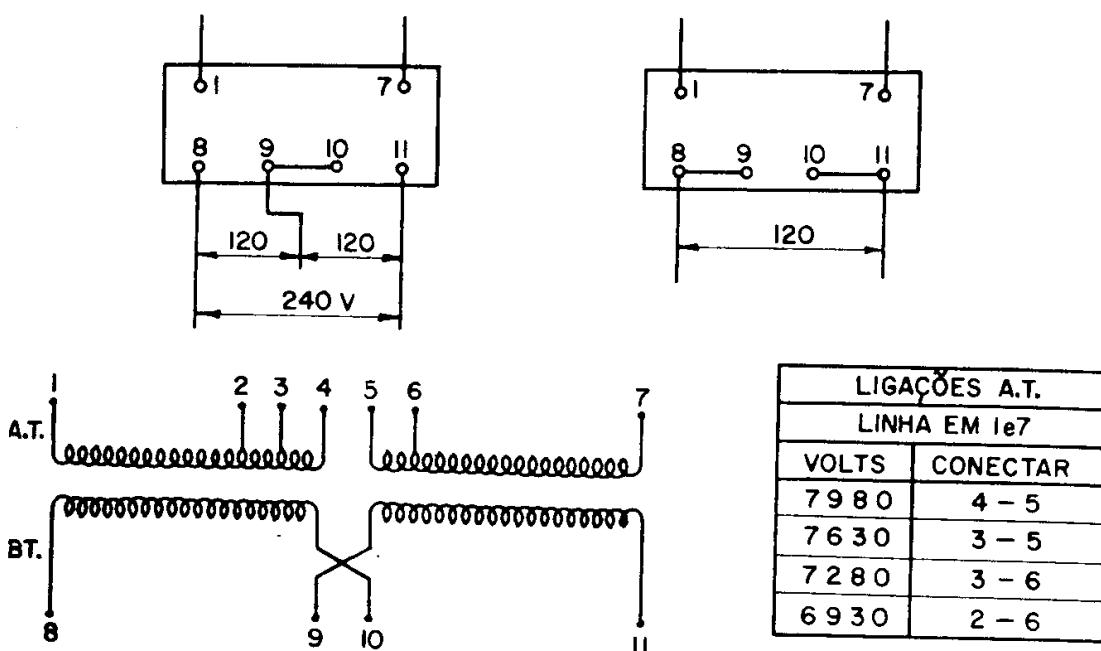


Fig. 268

Este agrupamento permite a alimentação de um circuito trifásico cuja potência é 3 vezes maior que o de cada transformador.

No caso de avaria de uma unidade, o circuito A.T. e o B.T. funcionarão como circuitos em triângulo aberto, podendo ainda alimentar cargas trifásicas com 57% da potência total do banco.

Além do processo descrito, os bancos trifásicos podem ser agrupados em: estrela — triângulo; estrela — estrela e triângulo — estrela.

Os transformadores monofásicos de distribuição são fabricados para as potências de: 10; 15; 25; 37,5; 50; 75 e 100 kVA, para as classes de tensão de 5; 15 e 25 kV.

As tensões mais comuns do circuito A.T. são:

2290; 2210; 2130 volts
 7810; 7620; 7430 volts
 6900; 6600; 6300; 6000 volts
 7980; 7630; 7280; 6930 volts
 11 950; 11 400; 10 900; 10 400 volts
 13 335; 12 700; 12 065 volts.

A tensão do circuito B.T. geralmente é 120/240 V.

A fig. 268 mostra como efetuar as ligações dos bornes do circuito A.T. e do circuito B.T. a fim de obter-se a utilização do transformador com as diferentes tensões.

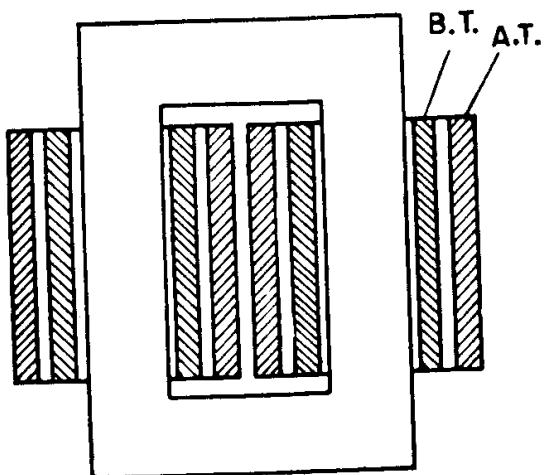


Fig. 269

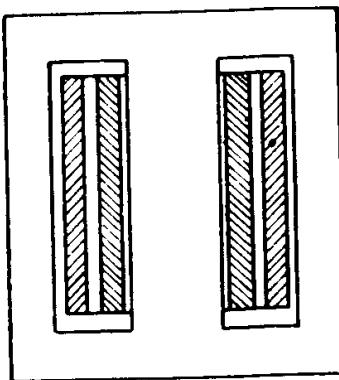


Fig. 270

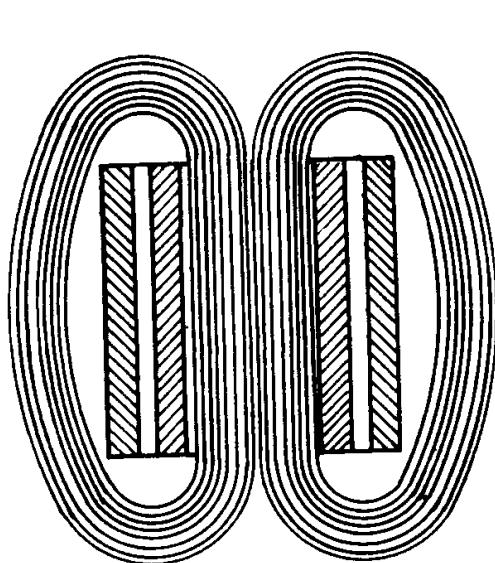


Fig. 271

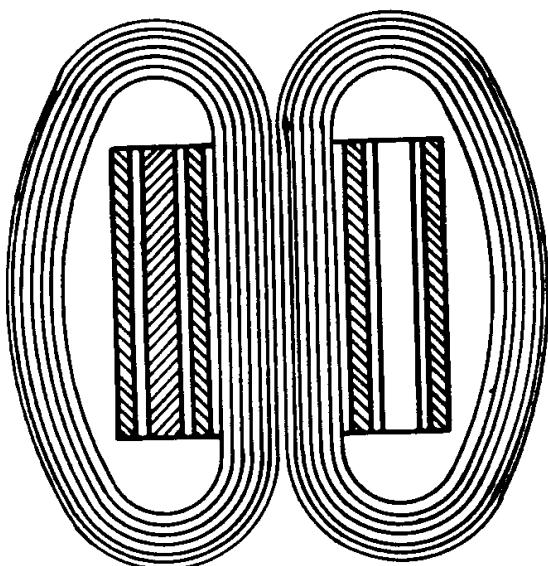


Fig. 272

Os transformadores de distribuição podem ser executados com núcleo envolvido, conforme fig. 269; com núcleo envolvente, conforme fig. 270 e com núcleo espiral, conforme figs. 271 e 272.

Na fig. 272 o enrolamento B.T. é dividido em duas partes, entre as quais está colocado o enrolamento A.T. Esta disposição tem a vantagem de apresentar considerável redução da reatância de dispersão, conforme foi visto no parágrafo 20.

O núcleo espiral constitui o circuito magnético ideal, pois desenvolve-se no sentido das linhas de força do campo magnético, e utiliza lâminas de ferro-silício com estrutura cristalina orientada, o que representa uma considerável redução das perdas no ferro. Neste tipo de lâminas a perda específica possui o valor: $w_{fe-10} = 0,81 \text{ W/kg}$, para a freqüência de 60 Hz.

O tipo de núcleo em espiral elimina a presença dos entreferros, que são inevitáveis nos núcleos convencionais, reduzindo o valor da corrente de excitação e por conseguinte melhorando o fator de potência dos circuitos de alimentação.

Os transformadores de distribuição utilizam fios esmaltados tipo "Formex", o que representa considerável vantagem de isolamento, pois uma camada de resina "Formvar" produz melhor isolamento que algumas camadas de papel ou de algodão. Além disso, as bobinas executadas com fio "Formex" são mecanicamente mais compactas do que as executadas com fio isolado com algodão.

O valor da indução máxima no núcleo espiral pode ser escolhido entre $B_M = 14\ 100$ gauss para os transformadores de 75 e 100 kVA e $B_M = 14\ 500$ gauss para os transformadores de 10 a 50 kVA.

Quanto à densidade de corrente no circuito A.T. é preciso salientar que esta é mínima (d_m) se o transformador é alimentado nos bornes correspondentes à maior tensão e máxima (d_M) quando o transformador é alimentado nos bornes correspondentes à menor tensão. Os valores da densidade de corrente no circuito A.T. e no B.T., em função da potência do transformador, estão indicados na tabela da fig. 273.

VALORES DA DENSIDADE DE CORRENTE PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO MONOFÁSICOS EM ÓLEO

d A/mm ²	POTÊNCIA EM kVA						
	10	15	25	37,5	50	75	100
Círculo A.T.; d_m	2,43	2,43	2,47	2,41	2,40	2,30	2,20
Círculo A.T.; d_M	2,82	2,82	2,78	2,78	2,75	2,50	2,40
Círculo B.T.	2,52	2,50	2,49	2,48	2,47	2,45	2,40

Fig. 273

VALORES DE "A_b" PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EM ÓLEO, COM NÚCLEO ESPIRAL E ENROLAMENTO TUBULAR DUPLO

Potência kVA	10	15	25	37,5	50	75	100
Valores de A _b	320	420	520	580	620	620	620

Fig. 274

Para o proporcionamento da altura "b" da bobina, usam-se os valores de " A_b " indicados na tabela da fig. 274. Estes valores correspondem aos transformadores com circuito B.T. dividido em duas partes, entre as quais está colocado o enrolamento A.T. conforme fig. 272.

Para transformadores do tipo indicado nas figs. 270 e 271, os valores de A_b indicados na tabela da fig. 274 devem ser divididos por 1,4.

Para transformadores do tipo indicado na fig. 269, os valores de A_b da fig. 274 devem ser divididos por 1,65.

Para o cálculo da seção do núcleo é válida a fórmula indicada no parágrafo 80, sendo os valores de "C" fornecidos pela tabela da fig. 275.

VALORES DE "C" PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EM ÓLEO
COM NÚCLEO ESPIRAL

Potência kVA	10	15	25	37,5	50	75	100
Valores de "C"	66	67	68	69	70	70	70

Fig. 275

96) PROJETO DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO, MONOFÁSICO, COM NÚCLEO ESPIRAL E ENROLAMENTO TUBULAR DUPLO

Potência: 10 kVA; freqüência: 60 Hz; alta tensão: $V_1 = 6930; 7280; 7630; 7980$ volts; baixa tensão: $V_2 = 120/240$ volts; classe de tensão: 15 kV.

O circuito B.T. é constituído por duas bobinas que podem ser ligadas em série ou em paralelo. Para o cálculo, considera-se a ligação em série, sendo o valor da tensão B.T.: $V_2 = 240$ volts.

O circuito A.T. deve ser calculado tomando por base sua tensão máxima, isto é: $V_1 = 7980$ volts. Correspondentemente, o valor da densidade de corrente, conforme a tabela da fig. 273, deverá ser considerado como sendo: $d_m = 2,43 \text{ A/mm}^2$.

Com o valor da densidade de corrente escolhido, a perda específica no cobre é: $w_{cu} = 2,43 \cdot d_m^2 = 2,43 \cdot 2,43^2 = 14,4 \text{ W/kg}$.

Para a construção do núcleo emprega-se a lâmina de ferro-silício com estrutura cristalina orientada, que para a freqüência de 60 Hz e a indução máxima $B_M = 10\,000$ gauss, apresenta a perda específica $w_{Fe-10} = 0,81 \text{ W/kg}$.

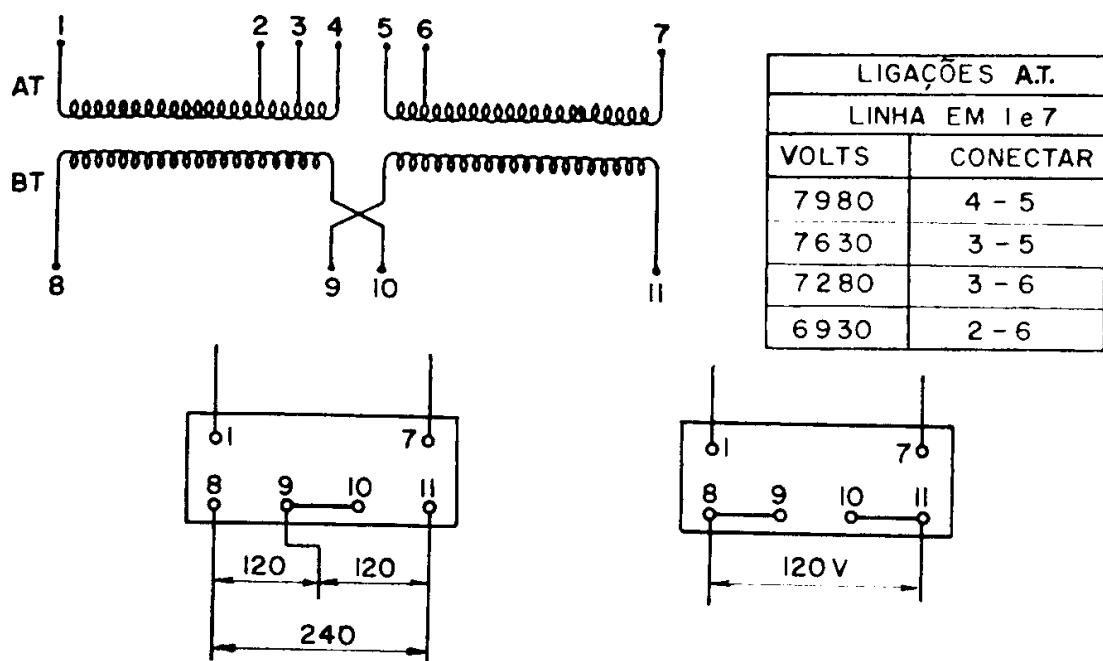


Fig. 276

Tendo a indução máxima no núcleo o valor $B_M = 14\ 500$ gauss, a perda específica no ferro é:

$$w_{Fe} = w_{Fe-10} \left(\frac{B_M}{10\ 000} \right)^2 = 0,81 \left(\frac{14\ 500}{10\ 000} \right)^2 = 1,7 \text{ W/kg.}$$

Da tabela da fig. 210 obtém-se: Perdas no ferro $w_{Fe} = 70$ watts; perdas no cobre $w_{cu} = 225$ watts; perdas totais = 295 watts. O fator "C", obtido pela tabela da fig. 275 é $C = 66$. A seção do núcleo é calculada conforme parágrafo 80.

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{\frac{W_2}{w_{Fe}} \cdot 10^5}{f \frac{W_{eu}}{W_{Fe}} d \cdot B_M}} = 66 \quad \left| \begin{array}{l} \frac{14,4}{10} \cdot 10^5 \\ \frac{1,7}{225} \\ \frac{60}{70} \cdot 2,43 \cdot 14\ 500 \end{array} \right. = 73,5 \text{ cm}^2$$

Para o tipo de chapa utilizada, considera-se o coeficiente de enchi-
mento 0,87, resultando que a superfície geométrica do núcleo possui
 $73,5$
o valor $S'_{Fe} = \frac{73,5}{0,87} = 85 \text{ cm}^2$.

As dimensões do núcleo estão indicadas na fig. 277.

Valor máximo do fluxo:

$$\phi_M = S_{Fe} \cdot B_M = 73,5 \cdot 14\ 500 = \\ = 1\ 065\ 750 \text{ maxwell.}$$

Distribuição da tensão entre os bornes do circuito A.T.

Bornes 1-2; $V_{1-2} = 3290$ volts

Bornes 2-3; $V_{2-3} = 350$ volts

Bornes 3-4; $V_{3-4} = 350$ volts

Bornes 5-6; $V_{5-6} = 350$ volts

Bornes 6-7; $V_{6-7} = 3640$ volts

$$\text{Total} = 7980 \text{ volts.}$$

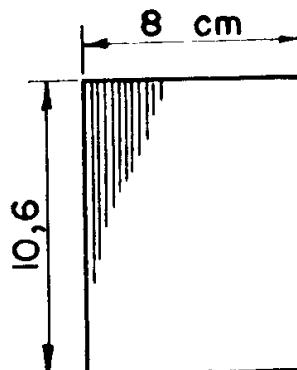


Fig. 277

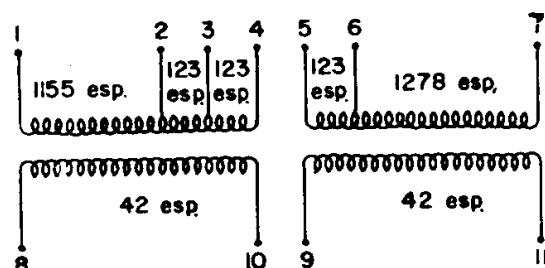


Fig. 278

Distribuição das espiras entre os bornes do circuito A.T.

Número total das espiras:

$$N = \frac{V \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \phi_M} = \frac{7980 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \cdot 1\ 065\ 750} = \sim 2800$$

$$\text{Espiras por volt} = \frac{2800}{7980} = 0,351$$

Bornes 1-2; $N_{1-2} = 0,351 \cdot 3290 = 1155$ espiras

Bornes 6-7; $N_{6-7} = 0,351 \cdot 3640 = 1278$ espiras

Bornes intermediários $N' = 0,351 \cdot 350 = 123$ espiras

Espiras do circuito B.T.; $N_2 = 0,351 \cdot 240 = 84$ espiras (42 espiras em cada bobina)

$$\text{Corrente no circuito A.T.}; I_1 = \frac{10\ 000}{7980} = 1,25 \text{ Ampères}$$

Da tabela da fig. 273 obtém-se o valor da densidade de corrente no circuito A.T. relativa à alimentação com tensão máxima, isto é, $d_m = 2,43 \text{ A/mm}^2$.

$$\text{Seção do condutor A.T.}; S_1 = \frac{I_1}{d_m} = \frac{1,25}{2,43} = 0,515 \text{ mm}^2$$

Usa-se o condutor n.^o 20 (AWG) cuja seção é $0,515 \text{ mm}^2$, e diâmetro $0,81 \text{ mm}$. O diâmetro do condutor isolado é $0,81 + 0,15 = 0,96 \text{ mm}$.

Quando o transformador for alimentado nos bornes correspondentes a 6930 volts, a corrente absorvida será $I_1 = \frac{10\,000}{6930} = \sim 1,45 \text{ A}$, sendo a

$$\text{densidade de corrente } d_M = \frac{1,45}{0,515} = 2,82 \text{ A/mm}^2.$$

Este valor coincide com o indicado pela tabela da fig. 273.

Com o transformador alimentado pela tensão máxima (7980 volts), o número de Ampère-espiras que atuam sobre o núcleo é $2N_1 I_1 = 2 \cdot 2800 \cdot 1,25 = \sim 7000$.

Da tabela da fig. 274 obtém-se o valor de $A_b = 320$; pelo que a altura da bobina resulta:

$$b = \frac{2N_1 I_1}{A_b} = \frac{7000}{320} = \sim 22 \text{ cm.}$$

a) Enrolamento B.T.

Foi visto anteriormente que o enrolamento B.T. possui 84 espiras. Sendo este enrolamento constituído por duas bobinas, cada bobina possuirá 42 espiras.

Com as duas bobinas B.T. agrupadas em série, a corrente nas mesmas será:

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{10\,000}{240} = 41,7 \text{ Amperes.}$$

A densidade de corrente no circuito B.T., conforme a tabela da fig. 273 é: $d = 2,52 \text{ A/mm}^2$. Seção do condutor do circuito B.T.: $S_2 = I_2/d = 41,7/2,52 = 16,5 \text{ mm}^2$.

Esta seção é obtida pelo agrupamento em paralelo de dois condutores de $(1,8 \times 4,6)$. Cada bobina de 42 condutores é executada numa única camada conforme fig. 279.

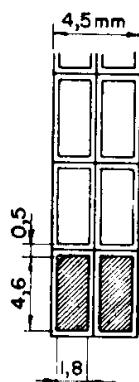


Fig. 279

O isolamento do condutor tem a espessura de 0,2 mm e a folga entre os condutores deve ser considerada de 0,1 mm.

Tendo cada bobina 42 condutores, a altura da bobina é:

$$b = (42 + 1) (4,6 + 0,4 + 0,1) = \\ = 219,3 \text{ mm} = \sim 22 \text{ cm.}$$

Espessura da bobina:

$$2 (1,8 + 0,4) + 0,1 = 4,5 \text{ mm.}$$

b) *Enrolamento A.T.*

O enrolamento A.T. possui o total de 2800 espiras distribuídas em 8 bobinas da seguinte forma:

$$6 \text{ bobinas com } 370 \text{ espiras} = 2220 \text{ espiras}$$

$$2 \text{ bobinas com } 290 \text{ espiras} = 580 \text{ espiras}$$

$$\text{Total} = 2800 \text{ espiras.}$$

As duas bobinas com 290 espiras possuem isolamento reforçado e estão colocadas nas cabeças do enrolamento.

As seis bobinas internas são enroladas em duas seções conforme fig. 280.

$$\frac{370}{24} \text{ Cada bobina possui } \sim 16 \text{ camadas.}$$

O diâmetro do condutor isolado é 0,96 mm.

O isolamento entre as camadas tem a espessura de 0,1 mm e o isolamento externo tem a espessura de 0,3 mm.

$$\text{Altura da bobina } h_1 = 24 \cdot 0,96 + 0,4 + 2 \cdot 0,3 = \sim 24 \text{ mm.}$$

$$\text{Largura da bobina } l_1 = 16 \cdot 0,96 + 0,1 \cdot 15 + 2 \cdot 0,3 = 17,46 \text{ mm.}$$

As duas bobinas, colocadas nas cabeças do enrolamento, com 290 espiras e isolamento reforçado, devem possuir as mesmas dimensões das bobinas internas.

As oito bobinas são colocadas uma sobre a outra, ficando entre elas a distância axial = $(220 - 8 \cdot 24)/7 = 4 \text{ mm.}$

c) *Disposição das bobinas*

A disposição das bobinas é feita conforme fig. 281.

O enrolamento B.T. interno é colocado sobre um carretel de material isolante com espessura de 2 mm.

A distância entre as bobinas B.T. e A.T., conforme parágrafo 76 é:

$$l_3 = 0,6 \cdot kV = 0,6 \cdot 15 = 9 \text{ mm.}$$

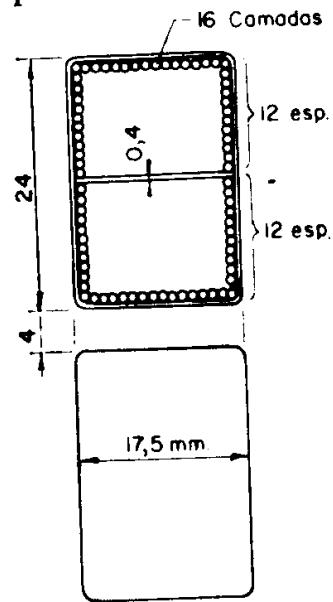


Fig. 280

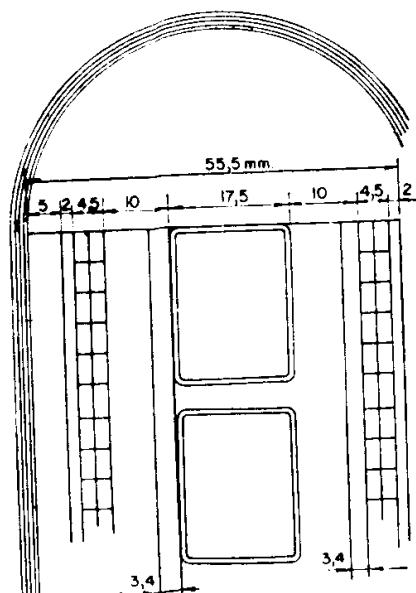


Fig. 281

Esta distância executa-se com 10 mm a fim de facilitar a circulação do óleo.

Entre a bobina A.T. e a B.T. é interposto um carretel de material isolante cuja espessura, conforme parágrafo 76 é:

$$t_2 = \frac{kV \text{ (Ensaio)}}{10} = \frac{34}{10} = 3,4 \text{ mm.}$$

d) *Cálculo dos pesos das partes ativas, das perdas e do rendimento*

A fig. 282 possui os dados necessários ao cálculo do peso do ferro. O comprimento médio de cada circuito magnético é:

$$l_m = 2 \cdot 220 + 2 \cdot \pi \cdot 50 = 754 \text{ mm} = 75,4 \text{ cm.}$$

Sendo a seção magnética do núcleo de $S_{fe} = 73,5 \text{ cm}^2$, o peso do ferro resulta: $P_{fe} = 7,8 \cdot S_{fe} \cdot l_m \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 73,5 \cdot 75,4 \cdot 10^{-3} = 43 \text{ kg.}$

A fig. 283 possui os dados necessários ao cálculo dos pesos do cobre:

Comprimento da espira média da bobina B.T. interna:

$$l'_{cu2} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 106 + 2\pi(7 + 2,25) = 430 \text{ mm} = 0,43 \text{ m.}$$

Comprimento da espira média da bobina B.T. externa:

$$l''_{cu2} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 106 + 2\pi(7 + 4,5 + 10 + 17,5 + 10 + 2,25) = \\ = 694 \text{ mm} = 0,694 \text{ m.}$$

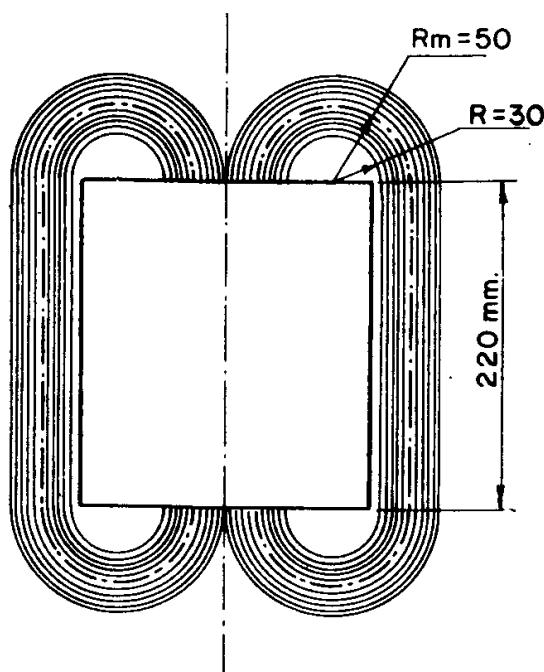


Fig. 282

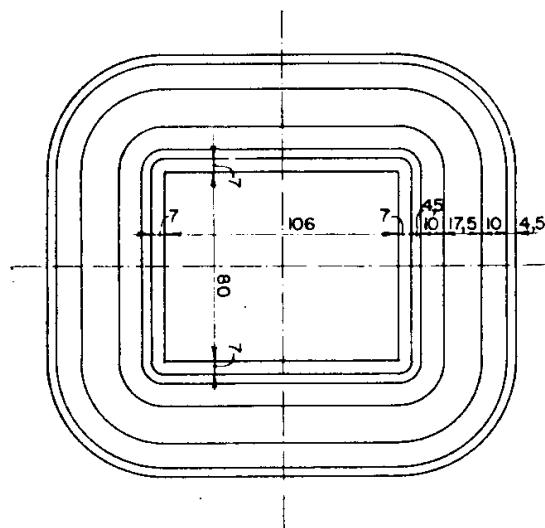


Fig. 283

Comprimento da espira média do circuito B.T.:

$$l_{cu2} = \frac{0,43 + 0,694}{2} = 0,562 \text{ m.}$$

Comprimento da espira média do circuito A.T.:

$$l_{cu1} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 106 + 2\pi (7 + 4,5 + 10 + 8,75) = 562 \text{ mm} = 0,562 \text{ m.}$$

Peso do cobre do enrolamento A.T.:

$$P_{cu1} = 8,9 \cdot l_{cu1} \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 0,562 \cdot 2800 \cdot 0,515 \cdot 10^{-3} = 7,2 \text{ kg.}$$

Peso do cobre do enrolamento B.T.:

$$P_{cu2} = 8,9 \cdot l_{cu2} \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 0,562 \cdot 84 \cdot 16,5 \cdot 10^{-3} = 6,92 \text{ kg.}$$

Cálculo da resistência ôhmica das bobinas a 75°C:

$$\text{Bobina A.T.; } r_1 = \frac{\rho \cdot l_{cu1} \cdot N_1}{S_1} = \frac{0,0216 \cdot 0,562 \cdot 2800}{0,515} = 66 \text{ ohms.}$$

$$\text{Bobina B.T.; } r_2 = \frac{\rho \cdot l_{cu2} \cdot N_2}{S_2} = \frac{0,0216 \cdot 0,562 \cdot 84}{16,5} = 0,062 \text{ ohms.}$$

Perdas no cobre:

$$W_{cu} = (r_1 I^2_1 + r_2 I^2_2) = (66 \cdot 1,25^2 + 0,062 \cdot 41,7^2) = 103 + 108 = 211 \text{ watts.}$$

Perdas no ferro:

$$W_{fe} = w_{fe} \cdot P_{fe} = 1,7 \cdot 43 = 73 \text{ watts.}$$

$$\text{Perdas totais} = W_{cu} + W_{fe} = 211 + 73 = 284 \text{ watts.}$$

Os valores calculados são próximos dos indicados na tabela da fig. 210.

Rendimento:

$$\mu = \frac{W_2}{W_2 + W_{cu} + W_{fe}} = \frac{10\,000}{10\,000 + 284} = 0,975$$

e) Tensão de curto-circuito ou tensão de impedância

Resistência equivalente ao circuito A.T.:

$$R'_e = r_1 + r_2 \cdot m^2 = 66 + 0,062 \left(\frac{2800}{84} \right)^2 = 66 + 69 = 135 \text{ ohms.}$$

Reatância de dispersão, referida ao circuito A.T., conforme parágrafo 20:

$$X'_e = 3,95 \frac{f \cdot l_{eu} \cdot N_1^2}{b} \cdot K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) \cdot 10^{-8}$$

f = freqüência (60 Hz)

$$l_{eu} = \text{comprimento médio das espiras} = \frac{l_{eu1} + l_{eu2}}{2} = \frac{0,562 + 0,562}{2} = \\ = 0,562 \text{ m} = 56,2 \text{ cm.}$$

N_1 = Número das espiras da bobina A.T. = 2800

b = Altura axial da bobina = 22 cm.

d = distância entre as bobinas B.T. e A.T. = 1 cm.

a_1 = espessura da bobina A.T. = 1,75 cm.

a_2 = espessura da bobina B.T. = 0,45 cm.

K = fator de correção sendo:

$$K = 1 - \frac{2d + a_1 + a_2}{2 \cdot \pi \cdot b} = 1 - \frac{2 + 1,75 + 0,45}{2 \cdot \pi \cdot 22} = \sim 0,97$$

$$X'_e = 3,95 \frac{60 \cdot 56,2 \cdot 2800^2}{22} \cdot 0,97 \left(1 + \frac{1,75 + 0,45}{6} \right) \cdot 10^{-8} = \\ = 47,5 \cdot 0,97 \cdot 1,37 = 63 \text{ ohms.}$$

$$Z'_e = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2} = \sqrt{135^2 + 63^2} = \sim 148 \text{ ohms.}$$

Tensão de curto-circuito ou de impedância

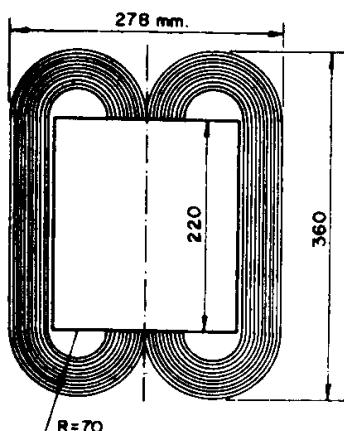


Fig. 284

$$V_{cc} = Z'_e \cdot I_1 = 148 \cdot 1,25 = 185 \text{ volts}$$

$$\% V_{cc} = \frac{185 \cdot 100}{7980} = \sim 2,32$$

Valor inferior ao da tabela da fig. 210.

A largura total do transformador: $80 + 2.59 + 2.40 = 278 \text{ mm.}$

Altura do transformador:

$$220 + 2.70 = 360 \text{ mm.}$$

O transformador é montado num tanque cilíndrico sem reservador de óleo, cujas dimensões estão indicadas na fig. 245. No tanque em questão, conforme foi calculado, o óleo sofre a elevação de temperatura de 46°C.

97) TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE DISTRIBUIÇÃO EM ÓLEO COM NÚCLEO CONVENCIONAL E LÂMINAS DE FERRO-SILÍCIO COMUM

A diferença básica entre o transformador com núcleo em espiral e o com núcleo convencional consiste no fato de serem, neste último, as perdas no ferro consideravelmente maiores que no primeiro.

O elevado valor das perdas no ferro, nos transformadores com núcleo convencional é devido ao fato de os mesmos usarem lâmina de ferro-silício comum.

Pelas razões expostas, ao se calcular um transformador monofásico com núcleo convencional e lâminas de ferro-silício comum, é preciso manter os valores de B_M próximos de 12 500 gauss e aumentar os valores das perdas no ferro, indicadas nas tabelas das figs. 210, 211, 212 e 213, conforme se verá a seguir.

a) *Transformadores com núcleo envolvente e enrolamento tubular duplo*

Podem ser usadas as mesmas fórmulas e os mesmos valores dos coeficientes utilizados para os transformadores de núcleo espiral, corrigindo entretanto o valor das perdas do ferro, o que é feito multiplicando por 1,2 os valores fornecidos pelas tabelas das figs. 210, 211, 212 e 213. Os valores de C são fornecidos pela tabela da fig. 275.

b) *Transformadores com núcleo envolvente e enrolamento tubular simples*

É preciso corrigir os valores das perdas no ferro, o que é feito multiplicando por 1,5 os fornecidos pelas tabelas das figs. 210, 211, 212 e 213. A correção dos valores de "A_b" é feita dividindo-se por 1,4 os valores fornecidos pela tabela da fig. 274.

c) *Transformadores com núcleo envolvido*

O valor de "C" é fornecido pela tabela da fig. 223, isto é, C = 55. Os valores de "A_b" são obtidos dividindo por 1,65 os indicados na tabela da fig. 274. O valor das perdas no ferro é obtido multiplicando por 1,2 os valores fornecidos pelas tabelas das figs. 210, 211, 212 e 213.

98) PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO EM ÓLEO COM NÚCLEO ENVOLVENTE DE LÂMINAS COMUNS E ENROLAMENTO TUBULAR DUPLO

O transformador que será calculado neste exercício de aplicação é idêntico ao do exercício anterior, mudando unicamente o núcleo espiral pelo núcleo convencional. A finalidade deste exercício é a comparação dos resultados com os obtidos no transformador com núcleo espiral.

O cálculo do transformador será realizado com base no valor máximo da tensão do circuito A.T., isto é, $V_1 = 7980$ volts. O valor correspondente da densidade de corrente, conforme a tabela da fig. 273 é:

$$d = 2,43 \text{ A/mm}^2.$$

Perdas específicas no cobre $w_{cu} = 2,43 \cdot d^2 = 2,43 \cdot 2,43^2 = 14,4 \text{ W/kg}$.

Para a construção do núcleo emprega-se chapa Armco, bitola n.º 29, isto é, com espessura de 0,356 mm, tipo M 14, que conforme a tab. ela da fig. 24, apresenta, para $f = 60 \text{ Hz}$ e $B_M = 10\,000$ gauss, a perda específica $W_{fe-10} = 1,14 \text{ W/kg}$. Para o valor $B_M = 12\,500$ gauss, a perda específica no ferro é:

$$w_{fe} = w_{fe-10} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 = 1,14 \left(\frac{12\,500}{10\,000} \right)^2 = 1,78$$

A tabela da fig. 210 fornece a perda no cobre $W_{cu} = 225$ watts. A perda no ferro deve ser calculada corrigindo-se o valor fornecido pela tabela acima referida, conforme parágrafo 96, isto é, $W_{fe} = 70 \cdot 1,2 = 84$ watts.

O valor de "C" fornecido pela tabela da fig. 275 é $C = 66$. A seção do núcleo é calculada conforme parágrafo 80.

$$S_{fe} = C \sqrt{\frac{W_2 \cdot 10^5}{f \cdot \frac{W_{cu}}{W_{fe}} \cdot d \cdot B_M}} = 66 \quad \sqrt{\frac{14,4 \cdot 10^5}{60 \cdot \frac{225}{84} \cdot 2,43 \cdot 12\,500}} = 85 \text{ cm}^2$$

Coeficiente de enchimento das lâminas usadas = 0,87; superfície geométrica do núcleo:

$$S'_{fe} = \frac{85}{0,87} = \sim 97 \text{ cm}^2.$$

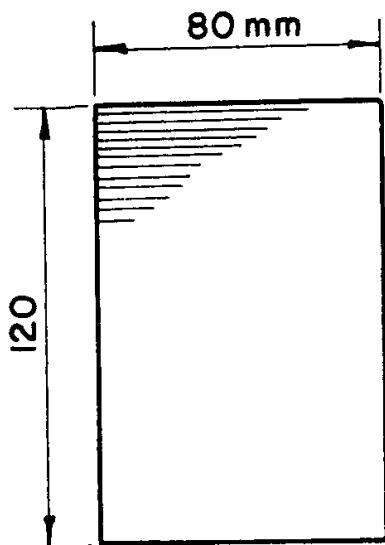


Fig. 285

As dimensões do núcleo estão indicadas na fig. 285.

Valor máximo do fluxo:

$$\phi_M = S_{Fe} \cdot B_M = 85 \cdot 12\ 500 = \\ \approx 1\ 062\ 500$$

Distribuição da tensão entre os bornes do circuito A.T.:

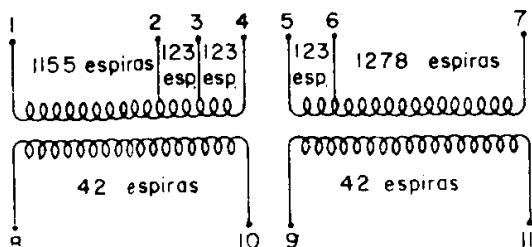
Bornes 1-2; $V_{1-2} = 3290$ volts
 Bornes 2-3; $V_{2-3} = 350$ volts
 Bornes 3-4; $V_{3-4} = 350$ volts
 Bornes 5-6; $V_{5-6} = 350$ volts
 Bornes 6-7; $V_{6-7} = 3640$ volts

$$\text{Total} = 7980 \text{ volts.}$$

Número total das espiras:

$$N_1 = \frac{V \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \phi_M} = \\ = \frac{7980 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \cdot 1\ 062\ 500} = \sim 2810 = \\ = \sim 2800$$

Fig. 286



$$\text{Espirais por volt} = \frac{2800}{7980} = 0,351$$

$$\text{Bornes } 1-2; N_{1-2} = 0,351 \cdot 3290 = 1155 \text{ espiras.}$$

$$\text{Bornes } 6-7; N_{6-7} = 0,351 \cdot 3640 = 1278 \text{ espiras.}$$

$$\text{Bornes intermediários } N' = 0,351 \cdot 350 = 123 \text{ espiras.}$$

$$\text{Espirais no circuito B.T.; } N_2 = 0,351 \cdot 240 = 84 \text{ (42 espiras por bobina).}$$

$$\text{Corrente no circuito A.T.; } I_1 = \frac{10\ 000}{7980} = 1,25 \text{ A.}$$

Da tabela da fig. 273 obtém-se o valor da densidade de corrente no circuito A.T., relativa à alimentação com tensão máxima, isto é, $d_m = 2,43 \text{ A/mm}^2$.

$$\text{Seção do condutor do circuito A.T.; } S_1 = \frac{I_1}{d_m} = \frac{1,25}{2,43} = 0,515 \text{ mm}^2.$$

Usa-se o condutor n.^o 20 (AWG) cuja seção é $S_2 = 0,515 \text{ mm}^2$ e diâmetro $0,81 \text{ mm}$.

O diâmetro do condutor isolado é $0,81 + 0,15 = 0,96 \text{ mm}$.

Quando o circuito A.T. for alimentado pelos bornes correspondentes à tensão de 6930 volts, a corrente absorvida será

$$I'_1 = \frac{10\,000}{6930} = \approx 1,45 \text{ A},$$

sendo a densidade de corrente $d_M = \frac{1,45}{0,515} = 2,82 \text{ A/mm}^2$.

Este valor coincide com o indicado na tabela da fig. 273.

Com o transformador alimentado pela tensão máxima (7980 V), o número de Ampère-espiras que atuam sobre o núcleo é:

$$2 N_1 I_1 = 2 \cdot 2800 \cdot 1,25 = 7000.$$

Da tabela da fig. 274 obtém-se o valor de $A_b = 320$, pelo que a altura da bobina resulta:

$$b = \frac{2 N_1 I_1}{A_b} = \frac{7000}{320} = \approx 22 \text{ cm}.$$

Distância entre as travessas e as cabeças das bobinas, conforme parágrafo 76: $l_1 = 1,3 \cdot kV = 1,3 \cdot 15 = 19,5 \text{ mm} = \approx 20 \text{ mm}$.

Altura da janela conforme fig. 288: $H = b + 2 \cdot l_1 = 22 + 4 = 26 \text{ cm}$.

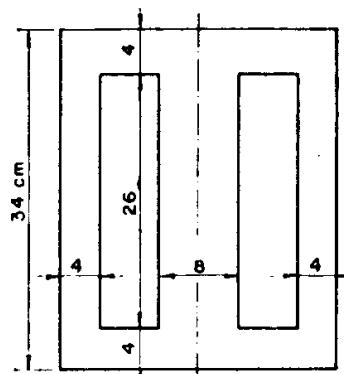


Fig. 287

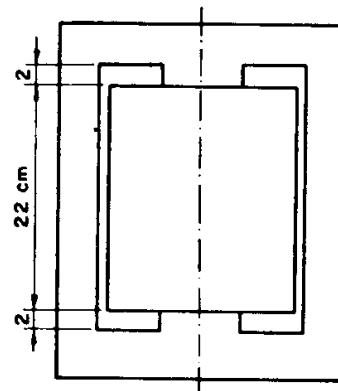


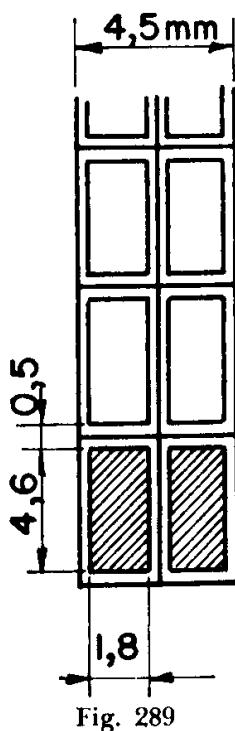
Fig. 288

a) Enrolamento B.T.

O número das espiras do enrolamento B.T., anteriormente calculado é $N_2 = 84$. Sendo este enrolamento constituído por duas bobinas, cada bobina possui 42 espiras.

Com as duas bobinas agrupadas em série a corrente nas mesmas será:

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{10\,000}{10\,000} = 41,7 \text{ Ampères}$$



A densidade de corrente no circuito B.T., conforme a tabela da fig. 273 é: $d = 2,52 \text{ A/mm}^2$. Seção do condutor do circuito B.T.: $S_2 = I_2/d = 41,7/2,52 = 16,5 \text{ mm}^2$.

Esta seção é obtida pelo agrupamento em paralelo de dois condutores de $(1,8 \times 4,6)$. Cada bobina de 42 condutores é executada numa única camada, conforme fig. 289.

O isolamento do condutor tem a espessura de 0,2 mm e a folga entre os condutores deve ser considerada de 0,1 mm.

Tendo cada camada 42 condutores, a altura da bobina é:

$$H_b = (42+1) (4,6 + 0,4 + 0,1) = 219,3 \text{ mm} = \sim 22 \text{ cm.}$$

Espessura da bobina

$$2(1,8 + 0,4) + 0,1 = 4,5 \text{ mm.}$$

b) Enrolamento A.T.

O enrolamento A.T. possui o total de 2800 espiras distribuídas em 8 bobinas da seguinte forma:

$$\begin{array}{rcl} 6 \text{ bobinas com } 370 \text{ espiras} & = & 2220 \text{ espiras} \\ 2 \text{ bobinas com } 290 \text{ espiras} & = & 580 \text{ espiras} \\ \hline & & \end{array}$$

$$\text{Total} = 2800 \text{ espiras.}$$

As duas bobinas com 290 espiras possuem isolamento reforçado e estão colocadas nas cabeças do enrolamento.

As seis bobinas internas são enroladas em duas seções conforme fig. 290.

Cada bobina possui $370/24 = \sim 16$ camadas.

O diâmetro do condutor isolado é 0,96 mm.

O isolamento entre as camadas tem espessura de 0,1 mm e o isolamento externo tem a espessura de 0,3 mm.

Altura da bobina $h_1 = 24 \cdot 0,96 + 0,4 + 2 \cdot 0,3 = \sim 24 \text{ mm.}$

Largura da bobina $l_1 = 16 \cdot 0,96 + 0,1 \cdot 15 + 2 \cdot 0,3 = 17,46 \text{ mm.}$

As duas bobinas, colocadas nas cabeças dos enrolamentos, com 290 espiras e isolamento reforçado, devem possuir as mesmas dimensões das bobinas internas.

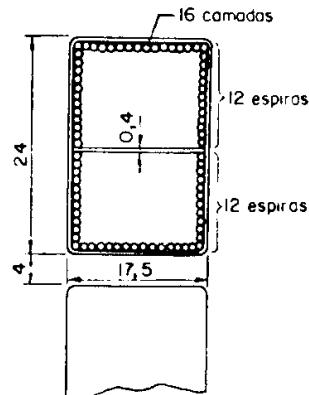


Fig. 290

As oito bobinas são colocadas uma sobre a outra, ficando entre elas a distância axial = $(220 - 8 \cdot 24)/7 = 4$ mm.

c) *Disposição dos elementos na janela*

A disposição dos elementos na janela está representada na fig. 291.

O enrolamento B.T. é colocado sobre um carretel de material isolante com a espessura de 2 mm.

A distância entre a bobina A.T. e a B.T., conforme parágrafo 76 é:

$$l_3 = 0,6 \text{ kV} = 0,6 \cdot 15 = 9 \text{ mm} = \sim = \sim 10 \text{ mm.}$$

Entre as bobinas A.T. e B.T. está interposto um carretel isolante cuja espessura, conforme parágrafo 76 é:

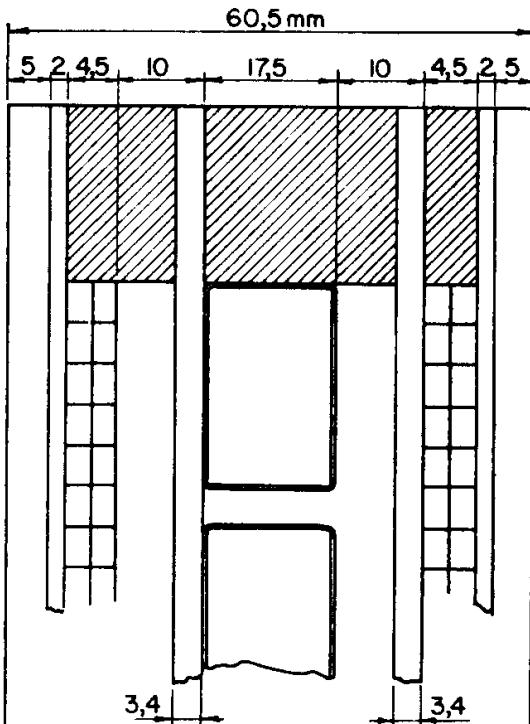


Fig. 291

$$t_2 = \frac{\text{kV (Ensaio)}}{10} = \frac{34}{10} = 3,4 \text{ mm.}$$

A largura da janela executa-se com 61 mm.

d) *Cálculo do peso do núcleo e das perdas no ferro*

O núcleo possui as dimensões indicadas na fig. 292. Seu peso é calculado conforme a fórmula indicada na fig. 233.

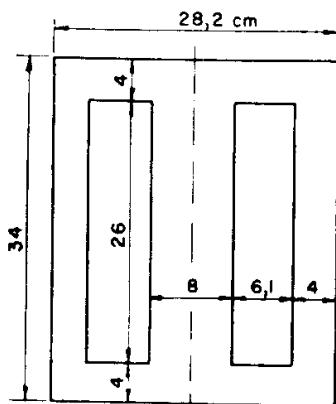


Fig. 292

$$\begin{aligned} P_{fe} &= 7,8 \cdot S_{fe} \cdot 2 [H + b_n + B] \cdot 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot 85 \cdot 2 [26 + 8 + 6,1] \cdot 10^{-3} = 53 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Perdas no ferro $P_{fe} = 1,78 \cdot 53 = 94,5$ watts.

e) *Cálculo do peso do cobre, das perdas e do rendimento*

A fig. 293 possui os dados necessários ao cálculo dos pesos do cobre.

Comprimento da espira média da bobina B.T. interna:

$$l'_{cu2} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 120 + 2\pi[7 + 2,25] \\ = 458 \text{ mm} = 0,458 \text{ m.}$$

Comprimento da espira média da bobina B.T. externa:

$$l''_{cu2} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 120 + 2\pi \\ [7 + 4,5 + 10 + 17,5 + 10 + 2,25] = \\ = 722 \text{ mm} = 0,722 \text{ m}$$

Comprimento da espira média do circuito B.T.

$$l_{cu2} = \frac{0,458 + 0,722}{2} = 0,59 \text{ m}$$

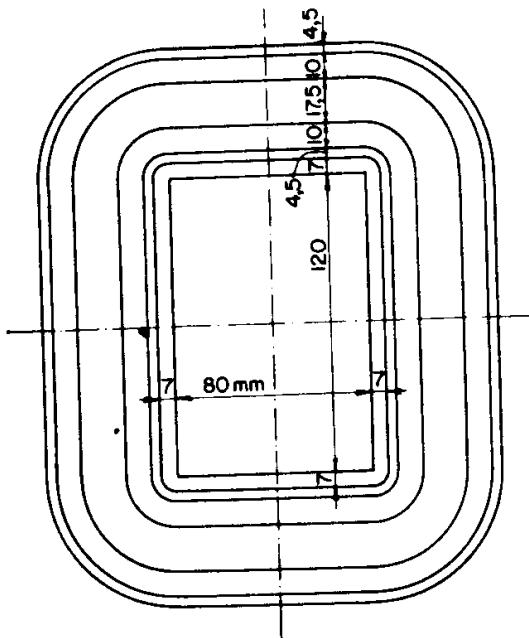


Fig. 293

Comprimento da espira média do circuito A.T.

$$l_{cu1} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 120 + 2\pi [7 + 4,5 + 10 + 8,75] = 590 \text{ mm} = 0,59 \text{ m.}$$

Peso do cobre do enrolamento A.T.:

$$P_{cu1} = 8,9 \cdot l_{cu1} \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 0,59 \cdot 2800 \cdot 0,515 \cdot 10^{-3} = 7,58 \text{ kg.}$$

Peso do cobre do enrolamento B.T.:

$$P_{cu2} = 8,9 \cdot l_{cu2} \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 0,59 \cdot 84 \cdot 16,5 \cdot 10^{-3} = 7,25 \text{ kg.}$$

Cálculo da resistência ôhmica das bobinas a 75°C:

$$\text{Bobina A.T.; } r_1 = \frac{\rho \cdot l_{cu1} \cdot N_1}{S_1} = \frac{0,0216 \cdot 0,59 \cdot 2800}{0,515} = 69 \text{ ohms.}$$

$$\text{Bobina B.T.; } r_2 = \frac{\rho \cdot l_{cu2} \cdot N_2}{S_2} = \frac{0,0216 \cdot 0,59 \cdot 84}{16,5} = 0,065 \text{ ohms.}$$

Perdas no cobre:

$$W_{cu} = (r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2) = (69 \cdot 1,25^2 + 0,065 \cdot 41,7^2) = 108 + 113 = 221 \text{ watts.}$$

As perdas no ferro já foram calculadas, sendo: $W_{fe} = 94,5 \text{ watts.}$

Perdas totais = $W_{cu} + W_{fe} = 221 + 94,5 = 315,5$ w.
Rendimento:

$$\mu = \frac{W_2}{W_2 + W_{cu} + W_{fe}} = \frac{10\,000}{10\,000 + 315,5} = 0,97$$

Tensão de curto-circuito ou tensão de impedância

Resistência equivalente do circuito A.T.

$$R'_e = r_1 + r_2 \cdot m^2 = 69 + 0,065 \left(\frac{2800}{84} \right)^2 = 69 + 72,5 = 141,5 \text{ ohms.}$$

Reatância de dispersão, referida ao circuito A.T., conforme parágrafo 20

$$X'_e = 3,95 \frac{f \cdot l_{eu} \cdot N_1^2}{b} \cdot K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) 10^{-8}$$

f = freqüência = 60 Hz

$$l_{eu} = \text{comprimento médio das espiras} = \frac{l_{eu1} + l_{eu2}}{2} = \frac{59 + 59}{2} = 59 \text{ cm}$$

N_1 = número das espiras do circuito A.T. = 2800 espiras

b = altura da bobina = 22 cm

d = distância entre as bobinas A.T. e B.T. = 1 cm

a_1 = espessura da bobina A.T. = 1,75 cm

a_2 = espessura da bobina B.T. = 0,45 cm

K = fator de correção sendo:

$$K = 1 - \frac{2 \cdot d + a_1 + a_2}{2 \cdot \pi \cdot b} = 1 - \frac{2 + 1,75 + 0,45}{2 \cdot \pi \cdot 22} = 0,97$$

$$X'_e = 3,95 \frac{60 \cdot 59 \cdot 2800^2}{22} 0,97 \left(1 + \frac{1,75 + 0,45}{6} \right) = \\ = 50 \cdot 0,97 \cdot 1,37 = 66,4 \text{ ohms}$$

$$Z'_e = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2} = \sqrt{141,5^2 + 66,4^2} = 156 \text{ ohms}$$

Tensão de curto-circuito ou de impedância:

$$V_{cc} = Z'_e \cdot I_1 = 156 \cdot 1,25 = 195 \text{ volts}$$

$$\% V_{cc} = \frac{195 \cdot 100}{7980} = 2,45$$

Valor próximo do indicado na tabela da fig. 210.

99) PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO EM ÓLEO COM NÚCLEO ENVOLVENTE DE LÂMINAS COMUNS E ENROLAMENTO TUBULAR SIMPLES

Neste exercício de aplicação será projetado um transformador com os mesmos dados característicos dos transformadores projetados nos parágrafos 96 e 98, a fim de comparar os resultados obtidos com os outros dois tipos de construção.

O transformador será calculado tomando em consideração o valor máximo da tensão do circuito A.T., isto é, $V_1 = 7980$ volts. O valor correspondente da densidade de corrente, conforme a tabela da fig. 273 é: $d = 2,43 \text{ A/mm}^2$.

Perdas específicas no cobre $w_{cu} = 2,43 \cdot d^2 = 2,43 \cdot 2,43^2 = 14,4 \text{ W/kg}$.

Para a construção do núcleo emprega-se chapa Armco, bitola n.º 29, isto é, com espessura de 0,356 mm, tipo M 14, que conforme a tabela da fig. 24, apresenta, para $f = 60 \text{ Hz}$ e $B_M = 10\,000 \text{ gauss}$, a perda específica $w_{fe} = 1,14 \text{ W/kg}$. Com o valor $B_m = 12\,500 \text{ gauss}$, a perda específica no ferro:

$$w_{fe} = w_{fe-10} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 = 1,14 \left(\frac{12\,500}{10\,000} \right)^2 = 1,78 \text{ W/kg.}$$

A perda no cobre, fornecida pela tabela da fig. 210 é $W_{cu} = 225 \text{ watts}$.

A perda no ferro obtém-se, conforme parágrafo 96, corrigindo o valor fornecido pela tabela da fig. 210, isto é: $W_{fe} = 70 \cdot 1,5 = 105 \text{ watts}$.

O valor de "C", fornecido pela tabela da fig. 275 é $C = 66$. A seção do núcleo é calculada conforme parágrafo 80.

$$S_{fe} = C \sqrt{\frac{W_2 \cdot \frac{w_{cu}}{w_{fe}} \cdot 10^5}{f \cdot \frac{W_{cu}}{W_{fe}} \cdot d \cdot B_M}} = 66 \quad \sqrt{\frac{14,4}{10 \frac{1,14}{1,78} \cdot 10^5}} = 94 \text{ cm}^2$$

$$60 \cdot \frac{225}{105} \cdot 2,43 \cdot 12\,500$$

Coeficiente de enchimento das lâminas usadas = 0,87; Superfície geométrica do núcleo:

$$S'_{te} = \frac{94}{0,87} = \sim 108 \text{ cm}^2.$$

As dimensões do núcleo estão indicadas na fig. 294.

Valor máximo do fluxo:

$$\phi_M = S_{te} \cdot B_M = 94 \cdot 12\,500 = 1\,175\,000 \text{ maxwell.}$$

Distribuição da tensão entre os bornes do circuito A.T.

Bornes 1-2; $V_{1-2} = 3290$ volts

Bornes 2-3; $V_{2-3} = 350$ volts

Bornes 3-4; $V_{3-4} = 350$ volts

Bornes 5-6; $V_{5-6} = 350$ volts

Bornes 6-7; $V_{6-7} = 3640$ volts

Total = 7980 volts.

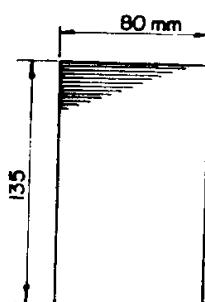


Fig. 294

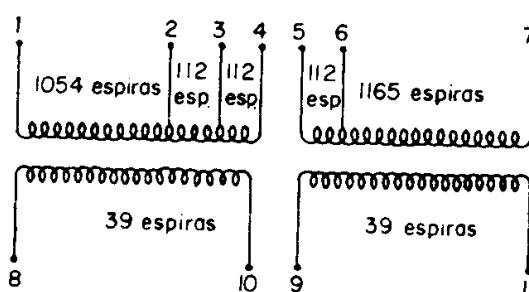


Fig. 295

Distribuição das espiras entre os bornes do circuito A.T.

Número total de espiras:

$$N = \frac{V \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_M} = \frac{7980 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 175\,000} = \sim 2550$$

$$\text{Espirais por volt} = \frac{2550}{7980} = 0,32$$

Bornes 1-2; $N_{1-2} = 0,32 \cdot 3290 = 1054$ espiras.

Bornes 6-7; $N_{6-7} = 0,32 \cdot 3640 = 1165$ espiras.

Bornes intermediários; $N'_1 = 0,32 \cdot 350 = 112$ espiras.

Espiras no circuito B.T.; $N_2 = 0,32 \cdot 240 = 76,8 = \sim 78$.

Corrente no circuito A.T. para a tensão máxima.

$$I_1 = \frac{10\,000}{7980} = 1,25 \text{ A.}$$

Da tabela da fig. 273 obtém-se o valor da densidade de corrente no circuito A.T., relativa à alimentação com tensão máxima, isto é:
 $d_m = 2,43 \text{ A/mm}^2$.

$$\text{Seção do condutor A.T.}; S_1 = \frac{I_1}{d_m} = \frac{1,25}{2,43} = 0,515 \text{ mm}^2.$$

Usa-se o condutor n.º 20 (AWG) cuja seção é $0,515 \text{ mm}^2$ e diâmetro $0,81 \text{ mm}$.

O diâmetro do condutor isolado é $0,81 + 0,15 = 0,96 \text{ mm}$.

Quando o circuito A.T. for alimentado pelos bornes correspondentes à tensão de 6930 volts, o valor da corrente absorvida será:

$$I_1 = \frac{10\,000}{6930} = 1,45 \text{ A.}$$

$$\text{Sendo a densidade da corrente } d_M = \frac{1,45}{0,515} = 2,82 \text{ A/mm}^2.$$

Este valor coincide com o indicado pela tabela da fig. 273.

Com o transformador alimentado pela tensão máxima (7980 volts) o número de Ampère-espiras que atuam sobre o núcleo é
 $2N_1 I_1 = 2 \cdot 2550 \cdot 1,25 = \sim 6350$.

Para o transformador de núcleo envolvente com o enrolamento tubular simples o valor de " A_b " é obtido efetuando a correção dos valores indicados pela tabela da fig. 274.

No presente caso, conforme parágrafo 96, $A_b = 320/1,4 = 228$.

$$\text{Altura da bobina } b = \frac{2N_1 I_1}{A_b} = \frac{6350}{228} = \sim 28 \text{ cm.}$$

Distância entre as travessas e as cabeças das bobinas, conforme parágrafo 76: $l_1 = 1,3 \cdot kV = 1,3 \cdot 15 = 19,5 \text{ mm} = \sim 20 \text{ mm}$.

Altura da janela, conforme fig. 296: $H = b + 2 \cdot l_1 = 28 + 4 = 32 \text{ cm}$.

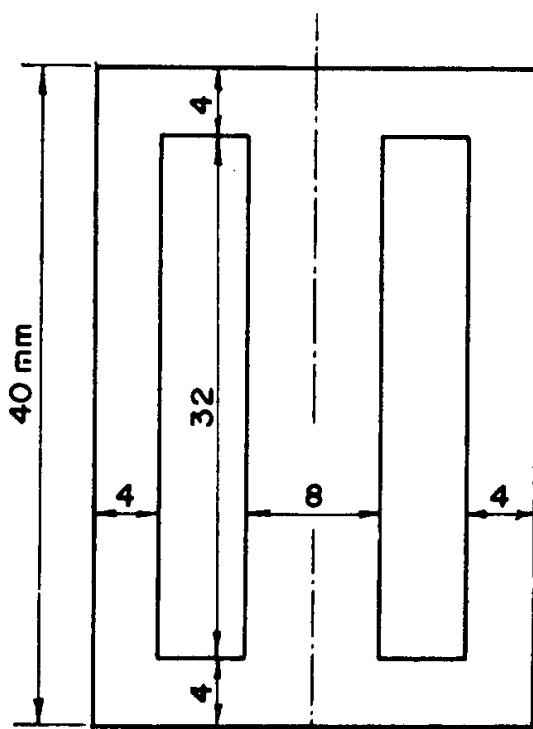


Fig. 296

a) *Enrolamento B.T.*

O número das espiras no circuito B.T. já foi calculado, sendo de 78. O circuito B.T. é constituído por duas bobinas, cada bobina possui 39 espiras.

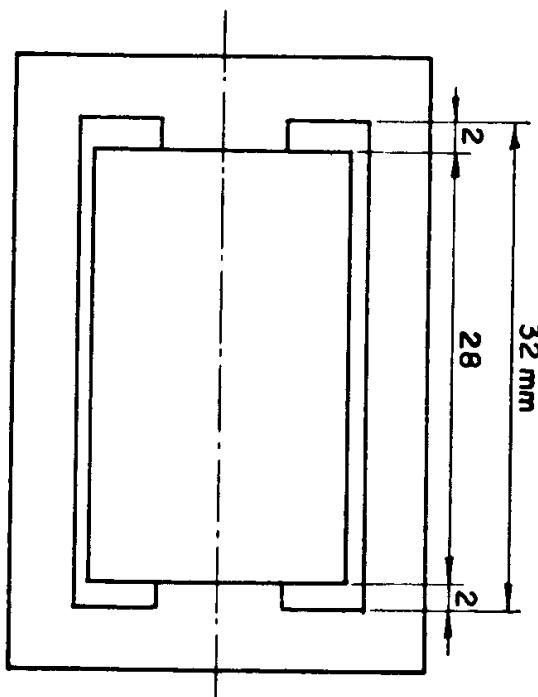


Fig. 297

Com as duas bobinas agrupadas em série, a corrente nas mesmas será:

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{10\,000}{240} = 41,7 \text{ Ampères.}$$

A densidade de corrente no circuito B.T. conforme a tabela da fig. 273 é: $d = 2,52 \text{ A/mm}^2$.

Seção do condutor B.T.: $S_2 = I_2/d = 41,7/2,52 = 16,5 \text{ mm}^2$.

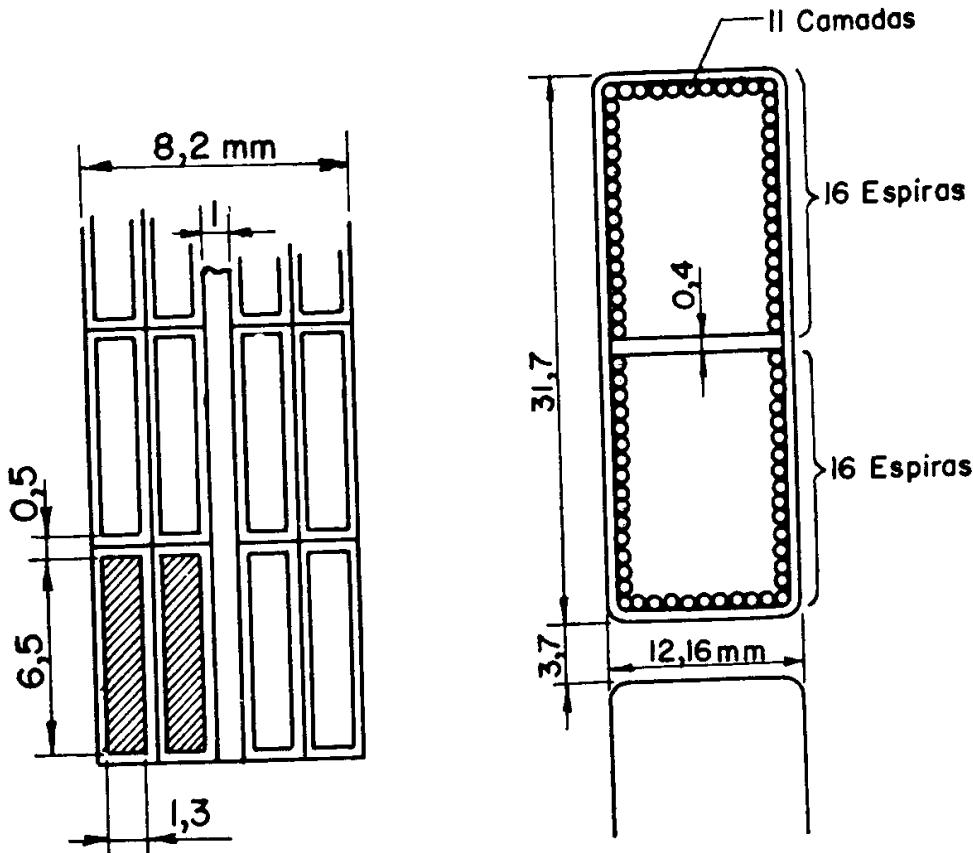


Fig. 298

Fig. 299

Esta seção é obtida pelo agrupamento em paralelo de dois condutores de $(1,3 \times 6,5) \text{ mm}$.

Cada bobina de 39 espiras é executada com uma camada. O isolamento entre as bobinas é feito com papel isolante de 1 mm de espessura conforme fig. 298.

O isolamento do condutor tem a espessura de 0,2 mm e a folga entre os condutores é de 0,1 mm.

Tendo cada camada 39 condutores a altura da bobina é:

$$b = (39 + 1) \cdot (6,5 + 0,4 + 0,1) = 280 \text{ mm} = 28 \text{ cm.}$$

Espessura da bobina:

$$4(1,3 + 0,4 + 0,1) + 1 = 8,2 \text{ mm.}$$

b) *Enrolamento de alta tensão*

O enrolamento de alta tensão possui o total de 2550 espiras distribuídas em 8 bobinas da seguinte forma:

$$\begin{array}{rcl} 6 \text{ bobinas com } 340 \text{ espiras} & = & 2040 \text{ espiras} \\ 2 \text{ bobinas com } 255 \text{ espiras} & = & 510 \text{ espiras} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{Total} = 2550 \text{ espiras.}$$

As duas bobinas com 255 espiras possuem isolamento reforçado e estão colocadas nas cabeças do enrolamento.

As seis bobinas internas são enroladas em duas seções conforme fig. 299.

$$\text{Cada bobina possui } \frac{340}{32} = 11 \text{ camadas.}$$

O diâmetro do condutor isolado é de 0,96 mm.

O isolamento entre as camadas tem a espessura de 0,1 mm e o isolamento externo tem a espessura de 0,3 mm.

Altura da bobina: $h_1 = 32 \cdot 0,96 + 0,4 + 2 \cdot 0,3 = 31,7 \text{ mm.}$

Largura da bobina: $l_1 = 11 \cdot 0,96 + 10 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,3 = 12,16 \text{ mm.}$

As duas bobinas colocadas nas cabeças do enrolamento, com 265 espiras e isolamento reforçado devem possuir as mesmas dimensões das bobinas internas.

As oito bobinas são colocadas uma sobre a outra, ficando entre elas a distância axial $= (280 - 8 \cdot 31,7)/7 = 3,7 \text{ mm.}$

c) *Disposição dos elementos na janela*

A disposição dos elementos na janela está representada na fig. 300.

A largura da janela é de 57 mm.

O enrolamento B.T. é colocado sobre um carretel de material isolante com a espessura de 2 mm.

A distância entre as bobinas B.T. e A.T., conforme parágrafo 76 é:

$$l_3 = 0,6 \cdot kV = 0,6 \cdot 15 = 9 \text{ mm} = \sim = \sim 10 \text{ mm.}$$

Entre a bobina A.T. e a B.T. está interposto um carretel de material isolante cuja espessura, conforme parágrafo 76 é:

$$t_2 = \frac{kV \text{ (Ensaio)}}{10} = \frac{34}{10} = 3,4 \text{ mm.}$$

A distância entre as bobinas A.T. e a parede da janela deve ser igual à que separa as cabeças das bobinas das travessas.

d) *Cálculo do peso do núcleo e das perdas no ferro*

O núcleo possui as dimensões indicadas na fig. 301 e seu peso é calculado conforme está indicado na fig. 233.

$$P_{fe} = 7,8 \cdot S_{fe} \cdot 2 [H + b_n + B]$$

$$10^{-3} = 7,8 \cdot 94 \cdot 2 [32 + 8 + 5,7]$$

$$10^{-3} = 67 \text{ kg.}$$

Perdas no ferro:

$$W_{fe} = w_{fe} \cdot P_{fe} = 1,78 \cdot 67 = = 119 \text{ watts.}$$

O valor calculado é próximo do estipulado no início do cálculo.

e) *Cálculo do peso do cobre, das perdas e do rendimento*

Comprimento da espira média do enrolamento B.T., conforme fig. 302 é:

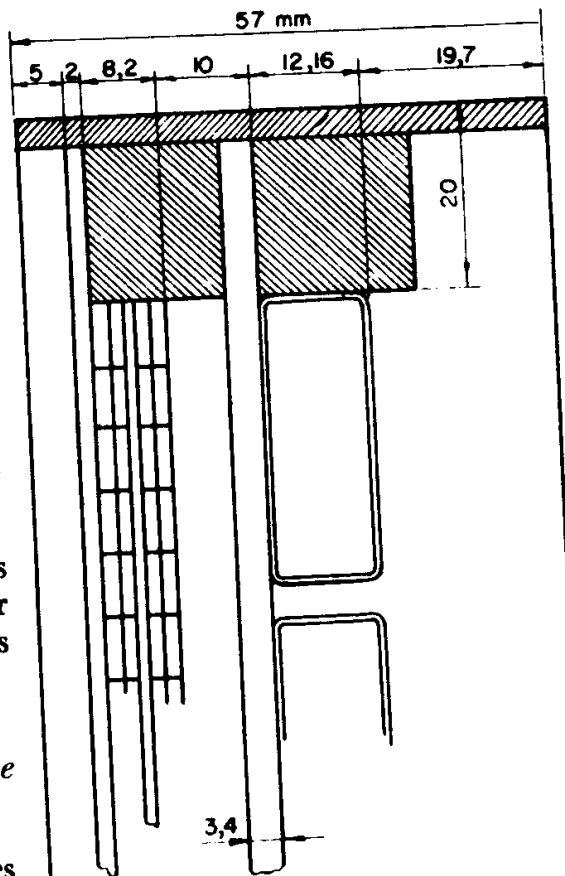


Fig. 300

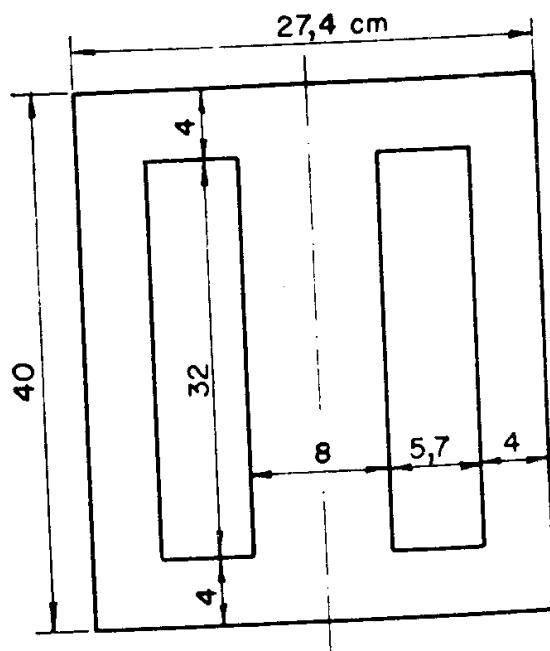


Fig. 301

$$l_{cu2} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 135 + 2\pi(7 + 4,1) = 500 \text{ mm} = 0,5 \text{ m.}$$

Comprimento da espira média do enrolamento A.T.:

$$l_{cu1} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 135 + 2\pi(7 + 8,2 + 10 + 6,08) = 626 \text{ mm} = 0,626 \text{ m.}$$

Peso do cobre do enrolamento B.T.:

$$P_{cu2} = 8,9 \cdot l_{cu2} \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-3} = \\ = 8,9 \cdot 0,5 \cdot 78 \cdot 16,5 \cdot 10^{-3} = 5,7 \text{ kg.}$$

Peso do cobre do enrolamento A.T.:

$$P_{cu1} = 8,9 \cdot l_{cu1} \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot 10^{-3} = \\ = 8,9 \cdot 0,626 \cdot 2550 \cdot 0,515 \cdot 10^{-3} = \\ = 7,3 \text{ kg.}$$

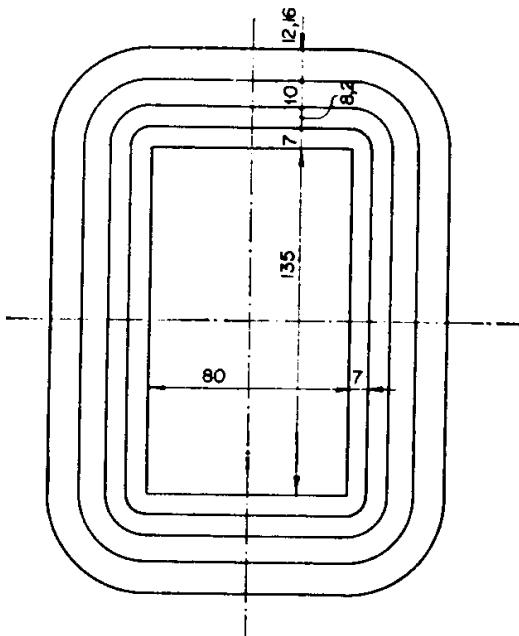


Fig. 302

Cálculo da resistência ôhmica das bobinas a 75°C:

$$\text{Bobina B.T.; } r_2 = \frac{\rho \cdot l_{cu2} \cdot N_2}{S_2} = \frac{0,0216 \cdot 0,5 \cdot 78}{16,5} = 0,051 \text{ ohms.}$$

$$\text{Bobina A.T.; } r_1 = \frac{\rho \cdot l_{cu1} \cdot N_1}{S_1} = \frac{0,0216 \cdot 0,626 \cdot 2550}{0,515} = 67 \text{ ohms.}$$

Perdas no cobre:

$$W_{cu} = (r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2) = (67 \cdot 1,25^2 + 0,051 \cdot 41,7^2) = 105 + 89 = 194 \text{ watts.}$$

$$\text{Perdas totais} = W_{fe} + W_{cu} = 119 + 194 = 313 \text{ watts.}$$

Rendimento:

$$\mu = \frac{W_2}{W_2 + (W_{fe} + W_{cu})} = \frac{10\,000}{10\,000 + 313} = 0,97$$

f) Tensão de curto-circuito ou tensão de impedância

Resistência equivalente do circuito A.T.:

$$R'_e = r_1 + r_2 \cdot m^2 = 67 + 0,051 \left(\frac{2550}{78} \right)^2 = 67 + 54,5 = 121,5 \text{ ohms.}$$

Reatância de dispersão, referida ao circuito A.T., conforme parágrafo 20:

$$X'_e = 7,9 \frac{f \cdot l_{eu} \cdot N_1^2}{b} \cdot K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-8}$$

f = freqüência (60 Hz).

l_{eu} = comprimento médio das espiras =

$$= \frac{l_{eu1} + l_{eu2}}{2} = \frac{62,6 + 50}{2} = 56,3 \text{ cm.}$$

N_1 = número das espiras da bobina A.T. = 2550

b = altura axial da bobina = 28 cm

d = distância entre as bobinas B.T. e A.T. = 1 cm

a_1 = espessura da bobina A.T. = 1,216 cm

a_2 = espessura da bobina B.T. = 0,82 cm

K = fator de correção, sendo:

$$K = 1 - \frac{2d + a_1 + a_2}{2 \cdot \pi \cdot b} = 1 - \frac{2 + 1,216 + 0,82}{2 \cdot \pi \cdot 28} = \sim 0,97$$

$$X'_e = 7,9 \frac{60 \cdot 56,3 \cdot 2550^2}{28} \cdot 0,97 \left(1 + \frac{1,216 + 0,82}{3} \right) 10^{-8} = \\ = 62,5 \cdot 0,97 \cdot 1,678 = 102 \text{ ohms.}$$

Valor da tensão de curto-circuito ou de impedância:

$$Z'_e = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2} = \sqrt{121,5^2 + 102^2} = 158,5 \text{ ohms.}$$

$$V_{cc} = Z'_e \cdot I_1 = 158,5 \cdot 1,25 = 198,5 \text{ volts.}$$

$$\% V_{cc} = \frac{198,5 \cdot 100}{7980} = \sim 2,48$$

Este valor praticamente é igual ao indicado pela tabela da fig. 210.

100 PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFASICO EM ÓLEO, COM NÚCLEO ENVOLVIDO DE LÂMINAS COMUNS E ENROLAMENTO TUBULAR SIMPLES DISTRIBUÍDO NAS DUAS COLUNAS

Neste exercício de aplicação será projetado um transformador com os mesmos dados característicos dos projetados nos parágrafos 96, 98 e 99 a fim de comparar os resultados com os obtidos com os outros três tipos de construção.

O transformador será calculado tomando em consideração o valor máximo da tensão do circuito A.T., isto é, $V_1 = 7980$ volts. O valor correspondente da densidade de corrente, conforme a tabela da fig. 273 é: $d = 2,43 \text{ A/mm}^2$.

Perdas específicas no cobre:

$$W_{cu} = 2,43 \cdot d^2 = 2,43 \cdot 2,43^2 = 14,4 \text{ W/kg.}$$

Para a construção do núcleo emprega-se chapa Armco, bitola n.º 29, isto é, com espessura de 0,356 mm, tipo M 14 que, conforme a tabela da fig. 24, apresenta, para $f = 60 \text{ Hz}$ e $B_M = 10\,000$ gauss, a perda específica $w_{fe-10} = 1,14 \text{ w/kg}$. Com o valor $B_M = 12\,500$ gauss, a perda específica no ferro é:

$$w_{fe} = w_{fe-10} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 = 1,14 \left(\frac{12\,500}{10\,000} \right)^2 = 1,78 \text{ W/kg.}$$

A perda no cobre, fornecida pela tabela da fig. 210 é $W_{cu} = 225$ watts. A perda no ferro obtém-se, conforme parágrafo 96, corrigindo o valor fornecido pela tabela da fig. 210, isto é, $W_{Fe} = 70 \cdot 1,2 = 84$ watts. O valor "C", conforme parágrafo 96 é $C = 55$. A seção do núcleo é calculada conforme parágrafo 80.

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{W_2 \cdot 10^5}{\frac{w_{fe}}{f \cdot \frac{W_{cu}}{W_{fe}} \cdot d \cdot B_M}}} = 55 \quad \sqrt{\frac{10 \cdot 14,4 \cdot 10^5}{\frac{1,78}{\frac{225}{60 \cdot 2,43 \cdot 12\,500}}}} = \sim 70 \text{ cm}^2$$

Sendo o coeficiente de enchimento das lâminas usadas 0,87, a seção geométrica do núcleo é:

$$S'_{fe} = \frac{70}{0,87} = 80,5 \text{ cm}^2.$$

As dimensões do núcleo estão indicadas na fig. 303.

Valor máximo do fluxo:

$$\phi_M = S_{Fe} \cdot B_M = 70 \cdot 12\ 500 = \\ = 875 \cdot 10^3 \text{ maxwell}$$

Distribuição da tensão entre os bornes do circuito A.T.:

Bornes 1-2; $V_{1-2} = 3290$ volts

Bornes 2-3; $V_{2-3} = 350$ volts

Bornes 3-4; $V_{3-4} = 350$ volts

Bornes 5-6; $V_{5-6} = 350$ volts

Bornes 6-7; $V_{6-7} = 3640$ volts

$$\text{Total} = 7980 \text{ volts.}$$

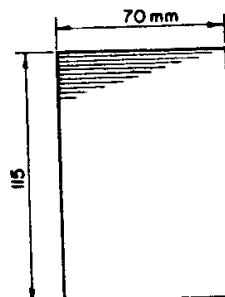


Fig. 303

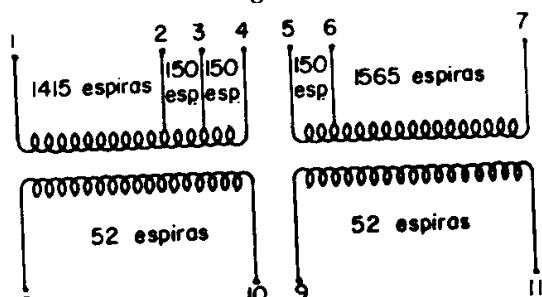


Fig. 304

Distribuição das espiras entre os bornes do circuito A.T.:

Número das espiras:

$$N_1 = \frac{V \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \phi_M} = \frac{7980 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \cdot 875 \cdot 10^3} = \sim 3430 \text{ espiras}$$

$$\text{Espirais por volt} = \frac{3430}{7980} = 0,43$$

Bornes 1-2; $N_{1-2} = 0,43 \cdot 3290 = 1415$ espiras.

Bornes 6-7; $N_{6-7} = 0,43 \cdot 3640 = 1565$ espiras.

Bornes intermediários $N'_1 = 0,43 \cdot 350 = 150$ espiras.

Espirais no circuito B.T.; $N_2 = 0,43 \cdot 240 = 104$ espiras.

Corrente no circuito A.T. para a tensão máxima

$$I_1 = \frac{10\ 000}{7980} = 1,25 \text{ A.}$$

Da tabela da fig. 273 obtém-se o valor da densidade de corrente no circuito A.T., relativa à alimentação com tensão máxima, isto é, $d_m = 2,43 \text{ A/mm}^2$.

$$\text{Seção do condutor do circuito A.T.}; S_1 = \frac{I_1}{d_m} = \frac{1,25}{2,43} = 0,515 \text{ mm}^2.$$

Usa-se o condutor n.º 20 (AWG) cuja seção é de $0,515 \text{ mm}^2$ e diâmetro $0,81 \text{ mm}$. O diâmetro do condutor isolado é $0,81 + 0,15 = 0,96 \text{ mm}$.

Quando o circuito A.T. for alimentado pelos bornes correspondentes à tensão de 6930 volts, o valor da corrente absorvida será:

$$I_1 = \frac{10\,000}{6930} = 1,45 \text{ A.}$$

$$\text{Sendo a densidade de corrente } d_m = \frac{1,45}{0,515} = 2,82 \text{ A/mm}^2.$$

Este valor coincide com o indicado na tabela da fig. 273.

Com o transformador alimentado pela tensão máxima (7980 volts), o número de Ampère-espiras atuando em cada coluna é:

$$N_1 \cdot I_1 = 3430 \cdot 1,25 = 4287.$$

O valor de “ A_b ”, conforme parágrafo 96 é obtido dividindo por 1,65 o valor indicado na tabela da fig. 274, isto é, $A_b = 320/1,65 = 195$.

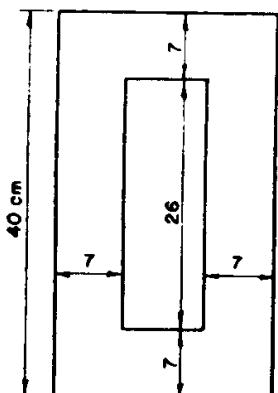


Fig. 305

Altura da bobina:

$$b = \frac{4287}{195} = 22 \text{ cm.}$$

Distância entre as travessas e as cabeças dos enrolamentos, conforme parágrafo 76:

$$l_1 = 1,3 \cdot kV = 1,3 \cdot 15 = 19,5 \text{ mm} = \approx 20 \text{ mm.}$$

Altura da janela, conforme fig. 305:

$$H = b + 2 \cdot l_1 = 22 + 4 = 26 \text{ cm.}$$

a) *Enrolamento B.T.*

O enrolamento B.T. é constituído por duas bobinas, colocadas cada uma numa coluna do transformador.

Cada bobina possui $104/2 = 52$ espiras.

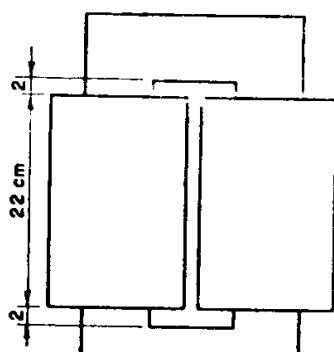


Fig. 306

Considerando as bobinas agrupadas em séries a corrente nas mesmas é:

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{10\,000}{240} = 41,7 \text{ A.}$$

A densidade de corrente no circuito B.T., conforme a tabela da fig. 273 é: $d = 2,52 \text{ A/mm}^2$.

Seção do condutor B.T.:

$$S_2 = I_2/d = 41,7/2,52 = 16,5 \text{ mm}^2.$$

Esta seção é obtida pelo agrupamento em paralelo de dois condutores de $(2,3 \times 3,6) \text{ mm}^2$.

Cada bobina é executada numa única camada conforme fig. 307.

O isolamento do condutor tem a espessura de 0,2 mm e a folga entre os condutores deve ser considerada de 0,1 mm.

Tendo a bobina 52 espiras a altura da mesma é:

$$b = (52 + 1) (3,6 + 0,4 + 0,1) = 218 \text{ mm} = 21,8 \text{ cm.}$$

Espessura da bobina:

$$2(2,3 + 0,4) + 0,1 = 5,5 \text{ mm.}$$

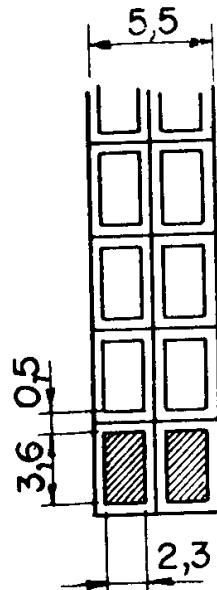


Fig. 307

b) *Enrolamento A.T.*

O enrolamento A.T. também é constituído por duas partes, cada uma das quais é colocada numa das colunas. Cada parte do enrolamento possui $3430/2 = 1715$ espiras distribuídas em 4 bobinas na seguinte forma:

$$\begin{array}{l} 2 \text{ bobinas com } 460 \text{ espiras} = 920 \text{ espiras} \\ 2 \text{ bobinas com } 398 \text{ espiras} = 796 \text{ espiras} \end{array}$$

$$\text{Total} = 1716 \text{ espiras.}$$

As duas bobinas de 398 espiras possuem isolamento reforçado e estão colocadas nas cabeças dos enrolamentos.

As duas bobinas internas são enroladas em duas seções conforme fig. 308.

Cada camada tem 52 espiras (26 em cada seção).

A separação das duas seções é feita com diafragma de prespann com a espessura de 0,4 mm.

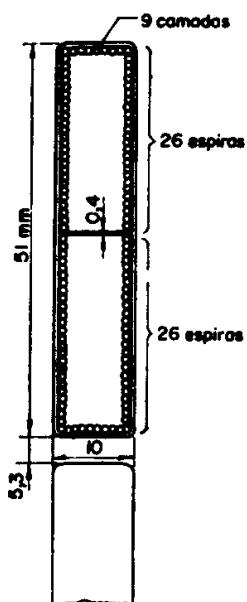


Fig. 308

$$\text{Cada bobina possui } \frac{460}{52} = 9 \text{ camadas.}$$

O diâmetro do condutor isolado é de 0,96 mm. O isolamento entre uma camada e a outra é feito com papel isolante com a espessura de 0,1 mm.

O isolamento externo é feito com cadarço e sua espessura pode ser considerada de 0,3 mm.

Altura da bobina:

$$h_1 = 52 \cdot 0,96 + 0,4 + 2 \cdot 0,3 = \sim 51 \text{ mm.}$$

Largura da bobina:

$$l_1 = 9 \cdot 0,96 + 8 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,3 = 10 \text{ mm.}$$

As duas bobinas, colocadas nas cabeças do enrolamento, com 398 espiras e isolamento reforçado, devem possuir as mesmas dimensões das bobinas internas.

As quatro bobinas são colocadas uma sobre a outra, ficando entre elas o espaço livre:

$$h_1 = (220 - 4 \cdot 51)/3 = 5,3 \text{ mm.}$$

c) Disposição dos elementos na janela

O enrolamento B.T. é colocado sobre um carretel de material isolante com espessura de 2 mm.

A distância entre a bobina B.T. e a A.T., conforme parágrafo 76 é $l_3 = 0,6 \text{ kV} = 0,6 \cdot 15 = 9 \text{ mm} = \sim 10 \text{ mm.}$

Entre a bobina A.T. e a B.T. é interposto um carretel de material isolante cuja espessura, conforme parágrafo 76 é:

$$t_2 = \frac{\text{kV (ensaio)}}{10} = \frac{34}{10} = 3,4 \text{ mm.}$$

A distância que separa as duas bobinas A.T. deve ser o dobro da existente entre a bobina A.T. e a B.T. da mesma coluna. A disposição dos elementos na janela está indicada na fig. 309.

d) Cálculo do peso do núcleo e das perdas no ferro

O núcleo possui as dimensões indicadas na fig. 310.

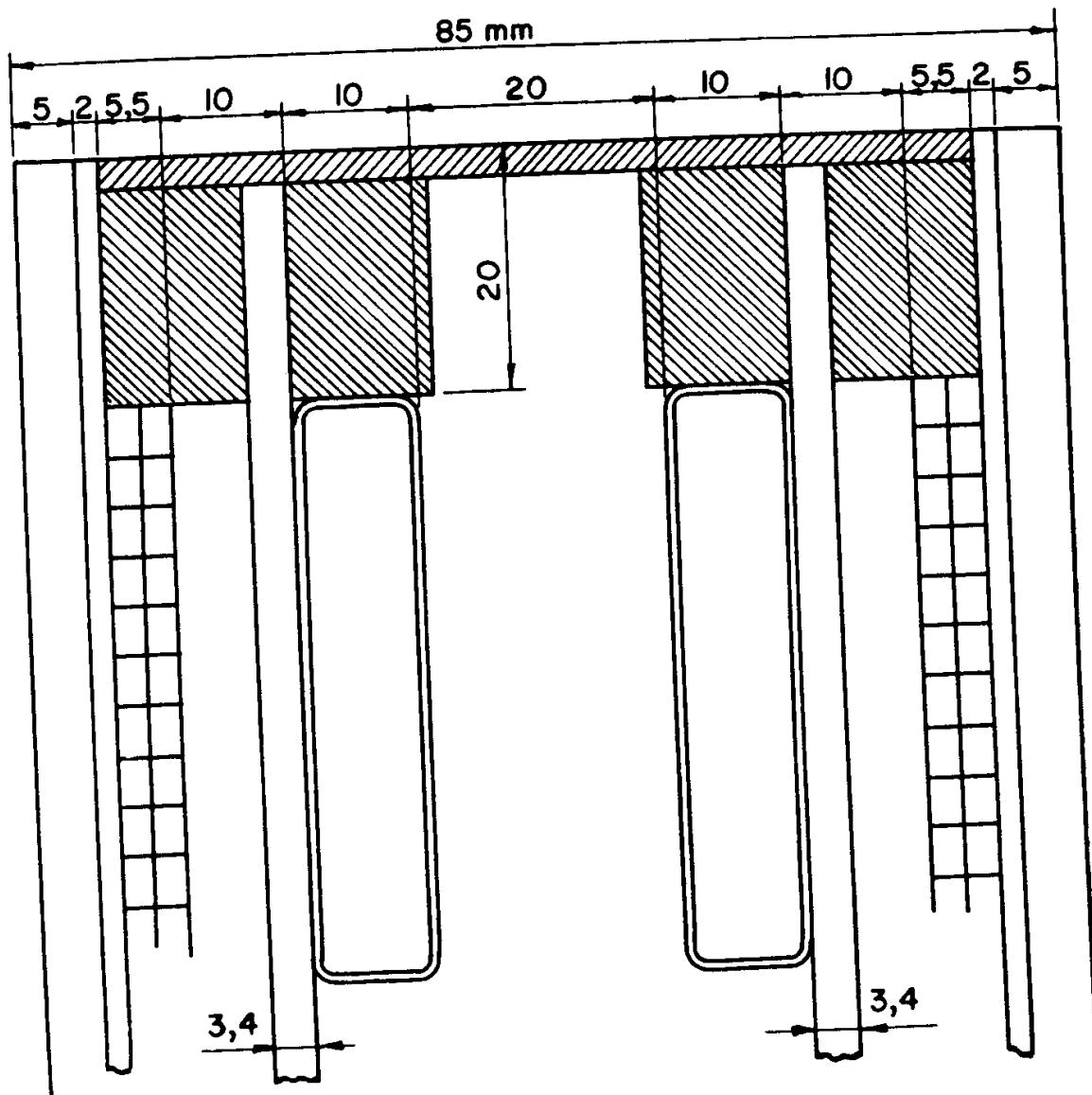


Fig. 309

Seu peso é calculado por meio da fórmula indicada na fig. 233.

$$P_{fe} = 7,8 \cdot S_{fe} \cdot 2(H + B + 2b_n) 10^{-3} = \\ = 7,8 \cdot 70 \cdot 2(26 + 8,5 + 2 \cdot 7) 10^{-3} = \sim 53 \text{ kg.}$$

Perdas no ferro:

$$W_{fe} = w_{fe} \cdot P_{fe} = 1,78 \cdot 53 = 94 \text{ w.}$$

e) Cálculo do peso do cobre, das perdas e do rendimento

O comprimento da espira média do enrolamento B.T., conforme fig. 311 é:

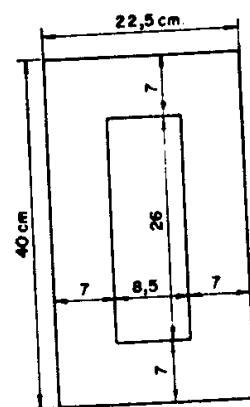


Fig. 310

$$l_{cu2} = 2.70 + 2.115 + 2\pi(7 + 2.75) = 431 \text{ mm} = 0.431 \text{ m.}$$

O comprimento da espira média do enrolamento A.T. é:

$$l_{cu1} = 2.70 + 2.115 + 2\pi(7 + 5.5 + 10 + 5) = 544 \text{ mm} = 0.544 \text{ m.}$$

Peso do cobre:

Nas duas bobinas B.T.,

$$\begin{aligned} P_{cu2} &= 8.9 \cdot l_{cu2} \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot 10^{-3} = \\ &= 8.9 \cdot 0.431 \cdot 104 \cdot 16.5 \cdot 10^{-3} = \\ &= 6.6 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Nas duas bobinas A.T.,

$$\begin{aligned} P_{cu1} &= 8.9 \cdot l_{cu1} \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot 10^{-3} = \\ &= 8.9 \cdot 0.544 \cdot 3430 \cdot 0.515 \cdot 10^{-3} = \\ &= 8.5 \text{ kg} \end{aligned}$$

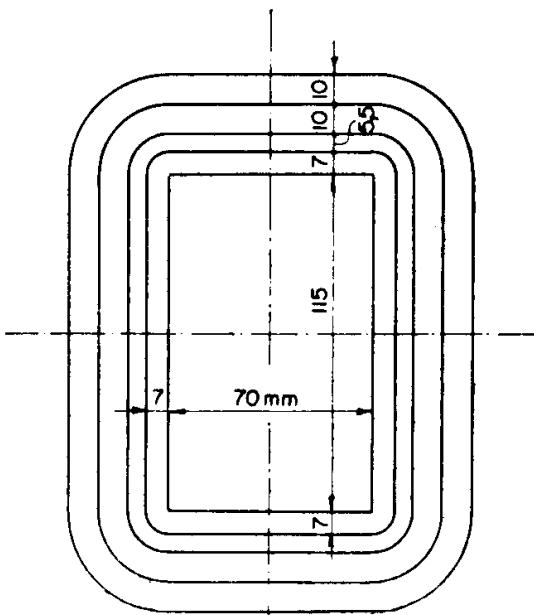


Fig. 311

Cálculo da resistência ôhmica das bobinas a 75°C:

$$\text{Bobina B.T.; } r_2 = \frac{\rho \cdot l_{cu2} \cdot N_2}{S_2} = \frac{0.0216 \cdot 0.431 \cdot 104}{16.5} = 0.059 \text{ ohms.}$$

$$\text{Bobina A.T.; } r_1 = \frac{\rho \cdot l_{cu1} \cdot N_1}{S_1} = \frac{0.0216 \cdot 0.544 \cdot 3430}{0.515} = 78 \text{ ohms}$$

Perdas no cobre:

$$W_{cu} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 = 78 \cdot 1.25^2 + 0.059 \cdot 41.7^2 = 122 + 103 = 225 \text{ watts.}$$

$$\text{Perdas totais} = W_{fe} + W_{cu} = 94 + 225 = 319 \text{ watts.}$$

$$\text{Rendimento: } \mu = \frac{W_2}{W_2 + (W_{fe} + W_{cu})} = \frac{10\,000}{10\,000 + 319} = 0.97$$

f) Tensão de curto-circuito ou tensão de impedância

Resistência equivalente do circuito A.T.:

$$R'_e = r_1 + r_2 \cdot m^2 = 78 + 0.059 \left(\frac{3430}{104} \right)^2 = 78 + 64.5 = 142.5 \text{ ohms}$$

A reatância de dispersão, referida ao circuito A.T., é calculada conforme parágrafo 20, tendo em consideração que as duas seções dos enrolamentos, colocadas nas duas colunas estão conectadas em série entre si.

$$X'_e = 2 \cdot 7,9 \frac{f \cdot l_{cu} \cdot N_1^2}{b} K \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) 10^{-8}$$

f = freqüência (60 Hz)

l_{cu} = comprimento médio das espiras =

$$= \frac{l_{cu1} + l_{cu2}}{2} = \frac{54,4 + 43,1}{2} = 48,75 \text{ cm}$$

N_1 = número das espiras da bobina A.T. numa coluna =

$$= 3430/2 = 1715 \text{ espiras.}$$

b = altura axial da bobina = 22 cm.

d = distância entre a bobina A.T. e B.T. = 1 cm.

a_1 = espessura da bobina A.T. = 1 cm.

a_2 = espessura da bobina B.T. = 0,55 cm.

K = fator de correção, sendo:

$$K = 1 - \frac{2 \cdot d + a_1 + a_2}{2 \cdot \pi \cdot b} = 1 - \frac{2 + 1 + 0,55}{2 \cdot \pi \cdot 22} = \sim 0,97$$

$$X'_e = 2 \cdot 7,9 \frac{60 \cdot 48,75 \cdot 1715^2}{22} 0,97 \left(1 + \frac{1 + 0,55}{3} \right) 10^{-8} = \\ = 61,7 \cdot 0,97 \cdot 1,52 = 91 \text{ ohms}$$

Valor da impedância de curto-circuito:

$$Z'_e = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2} = \sqrt{142,5^2 + 91^2} = 169 \text{ ohms}$$

Tensão de curto-circuito ou de impedância:

$$V_{cc} = Z'_e \cdot I_1 = 169 \cdot 1,25 = 211 \text{ volts}$$

$$\% V_{cc} = \frac{211 \cdot 100}{7980} = 2,65$$

Este valor é levemente superior ao indicado pela tabela da fig. 210. Desejando que o transformador apresente o valor da tensão de curto-

círcuito $\% V_{cc} = 2,5$ é preciso recalcular-lo com a bobina levemente mais alta ou com menor número de espiras.

Pode-se, por exemplo, aumentar a área do núcleo de aproximadamente 5% e diminuir o número das espiras na mesma proporção.

101) COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS PROJETOS

A fim de evidenciar a diferença dos resultados obtidos nos projetos executados nos parágrafos 96, 98, 99 e 100, os valores característicos dos mesmos foram transcritos na tabela da fig. 312. Os valores contidos nesta tabela indicam que, sob todos os aspectos, o transformador com núcleo espiral, de estrutura cristalina orientada com enrolamento tubular duplo é o mais conveniente.

TIPO	W_{fe} ω	W_{cu} ω	W_t ω	μ	P_{fe} kg	P_{cu} kg	$\% V_{cc}$
Monofásico, 10 kVA, núcleo espiral com lâminas de cristais orientados, enrolamento tubular duplo	73	211	284	0,97	43	14,12	2,32
Monofásico, 10 kVA, núcleo envolvente, com lâminas de Fe-Si comuns, enrolamento tubular duplo	94,5	221	315,5	0,97	53	14,83	2,45
Monofásico, 10 kVA, núcleo envolvente, com lâminas de Fe-Si comuns, enrolamento tubular simples	119	194	313	0,97	67	13,00	2,48
Monofásico, 10 kVA, núcleo envolvido, com lâminas de Fe-Si comuns, enrolamento tubular simples nas duas colunas	94	225	319	0,97	53	15,1	2,65

Fig. 312

ÍNDICE ALFABÉTICO E REMISSIVO

A

- Agrupamento de transformadores em paralelo — 128
Agrupamento em paralelo de bobinas de baixa tensão — 19
Agrupamento em série de bobinas de baixa tensão — 19
Agrupamento em série entre bobinas de B.T. — 19
Agrupamento estrela-estrela com f.e.m. de mesmo sentido — 126
Agrupamento estrela-estrela com ou sem fio neutro em transformadores trifásicos — 105
Agrupamento estrela-triângulo em transformadores monofásicos — 108, 127
Agrupamento estrela-ziguezague — 109
Agrupamento triângulo-estrela com ou sem fio neutro em transformadores trifásicos — 107, 127
Agrupamento triângulo-triângulo — 108, 126
Agrupamentos de circuitos magnéticos — 8
Água refrigerante, Temperatura máxima da — 183
Ajuste de tensão de um transformador — 188
Aplicações do transformador com corrente constante — 144
Aquecimento da bobina em transformador resfriado a ar — 229
Aquecimento do núcleo em transformadores resfriados a ar — 228
Ar ambiente, Temperatura máxima do — 182
Ascarel, Transformadores em líquido — 192
Associação de transformadores em paralelo — 128
Audiofreqüência, Transformadores de acoplamento de — 100
Autotransformador com várias entradas — 167, 169
Autotransformador divisor de tensão — 149
Autotransformador, Potência transformada de um — 149
Autotransformador trifásico — 122, 148
Autotransformadores monofásicos — 145
Autotransformadores monofásicos, Exemplos de cálculo de — 153

- Autotransformadores trifásicos, Considerações e dados para o projeto de — 157
Autotransformadores trifásicos, Exemplos de cálculo de — 158

B

- Bancos trifásicos em transformadores monofásicos de distribuição — 263
Bobina de reatância, Impedância de uma — 93
Bobina de reatância, Regulagem da — 93
Bobina dupla para enrolamentos de alta tensão — 21
Bobinas alternadas ou de disco, Enrolamento com — 17
Bobinas de choque — 93
Bobinas de reatância, Cálculo das — 93
Bobinas de reatância, Exemplos de cálculo das — 95
Bobinas em pequenos transformadores monofásicos — 74
Bornes correspondentes em transformadores em paralelo, Determinação prática dos — 130, 131
Bornes de um transformador, Numeração dos — 122
Bornes em transformadores em paralelo, Esquema de ligação dos — 128

C

- Cálculo da corrente a vazio — 32
Cálculo da reatância de dispersão — 58
Cálculo de um autotransformador, Considerações e dados para — 149
Capacidade de interrupção da chave protetora — 137
Características que devem ter os líquidos isolantes — 193
Carga reduzida, Transformador a — 8
Chapas para transformadores Acesita — 28
Chapas para transformadores Armco — 29
Chave de proteção, Poder de ruptura da — 136
Círculo equivalente do transformador com corrente constante — 143
Círculo primário equivalente — 49
Círculo secundário equivalente — 46
Classe de isolante — 182
Classe de tensão de isolamento — 180

Coeficiente de adução — 228, 233
Coeficiente de enchimento — 16, 221
Comprimento do entreferro da bobina de reatância — 94, 101
Condições para a ligação de transformadores em paralelo — 130, 131
Condutores empregados em transformadores — 73, 203
Conservador de líquido — 198
Constituição dos núcleos dos transformadores — 12
Construção de núcleos com juntas frontais ou encaixadas — 13
Construção dos enrolamentos de A.T. — 21
Construção dos enrolamentos de baixa tensão — 18
Correção da rigidez dielétrica com a altitude — 201
Corrente ativa — 31
Corrente ativa, Cálculo da — 32
Corrente a vazão, Cálculo da — 32
Corrente a vazão ou de excitação — 31, 184
Corrente constante, Transformador com — 140
Corrente magnetizante — 31
Corrente magnetizante, Cálculo da — 33
Corrente primária — 2
Corrente primária de reação — 7
Corrente secundária — 2
Corrente total a vazio — 34
Corrente a vazio nos transformadores trifásicos — 35
Correntes intensas, Enrolamentos B.T. para — 20
Correntes parasitas, Perdas no ferro por — 24
Correntes primárias e secundárias em transformadores monofásicos pequenos, Cálculo das — 78, 123
Curto-círcuito acidental — 136
Curto-círcuito do transformador, Propriedades relativas ao funcionamento em — 53
Curto-círcuito, Transformador monofásico em — 51
Curto-círcuito, Transformadores trifásicos em — 56

D

Dados necessários ao cálculo de um transformador — 77
Definições sobre transformadores — 179
Densidade de corrente em transformador de grande potência, Escolha da — 217
Derivações de um transformador — 188

Deslocamento angular de um transformador — 125
Diagrama de RAPP para a determinação da queda de tensão industrial — 61
Diagrama vetorial de um transformador ideal a vazio — 4
Diagrama vetorial de um transformador ideal com carga — 6
Diagrama vetorial do circuito primário equivalente — 50
Diagrama vetorial do circuito secundário equivalente — 49
Diagrama vetorial do transformador com corrente constante — 143
Diagramas vetoriais do transformador a vazio e com carga — 40
Dispersão magnética em transformadores com corrente constante — 142
Disposição das bobinas dos transformadores de pequena potência — 73
Dispositivo de comando magnético para regulador de tensão automática — 170
Dispositivo de comando térmico para regulador de tensão automático — 169
Dispositivo para neutro artificial em instalações de três fios — 161
Divisão da carga entre transformadores em paralelo — 132
Divisor de tensão — 149

E

Efeito pelicular na perda de potência no cobre — 68
Elevação máxima permitível da temperatura dos elementos — 183
Enrolamento A.T. para transformadores de grande potência — 204
Enrolamento B.T. para transformadores de grande potência — 203
Enrolamento de alta tensão — 2
Enrolamento de baixa tensão — 2
Enrolamento de discos, Reatância de dispersão em — 59
Enrolamento primário — 2
Enrolamento secundário — 2
Enrolamento tubular duplo e núcleo envolvente, transformador com — 275, 276
Enrolamento tubular duplo, Reatância de dispersão em — 59
Enrolamento tubular, Reatância de dispersão em — 58
Enrolamento tubular simples e núcleo envolvente — 275, 283
Enrolamentos B.T. para correntes intensas — 20
Enrolamentos com bobinas alternadas ou de disco — 17

Enrolamentos com bobinas sobrepostas — 19
 Enrolamentos concêntricos ou tubulares — 16
 Enrolamentos de A.T., Construção dos — 21
 Enrolamentos de baixa tensão, Construção dos — 18
 Enrolamentos de duas camadas — 18
 Enrolamentos, Indutância de dispersão dos — 37
 Enrolamentos, Reatância de dispersão nos — 38
 Enrolamentos, Resistências ôhmicas dos — 37
 Ensaios de rotina para transformadores — 185
 Ensaios de tensão, Finalidade dos — 188
 Ensaios de tipo para transformadores — 186
 Ensaios dielétricos — 186, 187
 Entrada trifásica e saída monofásica, Transformador com — 117
 Entreferro da bobina de reatância, Cálculo aproximado do — 94, 101
 Escolha do núcleo para transformadores pequenos — 81
 Escolha dos bornes para a ligação em paralelo de transformadores monofásicos — 130
 Escolha dos bornes para a ligação em paralelo de transformadores trifásicos — 131
 Espiras de um transformador monofásico pequeno, Número das — 81
 Esquema de cálculo de autotransformadores monofásicos — 152
 Esquemas usados em transformadores trifásicos — 129
 Estabilizador General Electric — 177
 Estabilizador Sola — 177
 Estabilizadores automáticos de tensão — 175
 Exemplo de cálculo de transformadores trifásicos com refrigeração natural — 114
 Exemplo de cálculo do transformador com entrada trifásica e saída monofásica — 118
 Exemplos de cálculo de autotransformadores monofásicos — 153
 Exemplos de cálculo de autotransformadores trifásicos — 158
 Exemplos de cálculo de bobinas de reatância — 95
 Exemplos de cálculo de dispositivo para neutro artificial — 161
 Exemplos de cálculo dos reguladores de tensão — 171

Exemplos de cálculo dos transformadores de acoplamento — 101
 Exemplos de cálculo de transformadores monofásicos — 84

F

Fator de enchimento de um transformador — 16, 221
 Fator de potência a vazio do transformador trifásico — 36, 45
 Fator de potência a vazio no transformador monofásico — 34, 43
 Fator de potência de curto-círcuito — 55
 Fator de potência do transformador com corrente constante — 144
 F.e.m. primária de curto-círcuito — 52
 F.e.m. primária e secundária — 3
 F.e.m. secundária de curto-círcuito — 51
 Fluxo de curto-círcuito — 51
 Fluxo no núcleo, Valor do — 4
 Forma da corrente a vazio ou de excitação — 31
 Fórmula de STEINMETZ — 25
 Fórmulas práticas para a tensão industrial — 63
 Freqüência nominal, Transformadores operando com freqüência diferente da — 199
 Freqüências indicadas para diversos transformadores de acoplamento — 100
 Freqüências nominais recomendadas — 184
 Funcionamento a vazio do transformador — 3, 31, 41
 Funcionamento com carga do transformador — 5, 43
 Funcionamento perfeito de transformadores em paralelo — 128, 132

H

Histerese magnética, Perdas no ferro por — 25

I

Impedância de uma bobina de reatância — 93
 Impedância equivalente, Determinação experimental da — 54
 Impedância equivalente primária — 51
 Impedância equivalente secundária — 48
 Impedância de compensação em transformadores em paralelo — 135
 Impedância primária transferida ao secundário — 47
 Indução em transformador de grande potência, Escolha da — 217

Indutância de dispersão dos enrolamentos — 37, 142
Isolamentos usados em transformadores — 73, 203
Isolante, Classe de — 182

J

Janela de transformadores monofásicos, Dimensões da — 75
Janela de um transformador de grande potência, Determinação das dimensões da — 220
Janela para transformadores trifásicos, Área da — 112
Juntas encaixadas, Núcleo com — 14
Juntas frontais, Núcleos com — 13

K

KAPP, Diagrama de — 61

L

Lâminas compridas — 77
Lâminas de um transformador trifásico de pequena potência — 112
Lâminas padronizadas — 74
Lâminas padronizadas, Peso do núcleo em — 76
Lâminas padronizadas, seção da janela — 75
Ligaçāo dos bornes em transformadores monofásicos em paralelo — 130
Ligaçāo dos bornes em transformadores trifásicos em paralelo — 131
Limite de utilização de um autotransformador — 147
Líquidos isolantes, Propriedades dos — 193
Líquidos isolantes usados em transformadores — 192

N

Neutro artificial em instalações com três fios, Dispositivo para — 161
Normas para a construção de transformadores — 179
Núcleo com juntas encaixadas — 11
Núcleo com juntas frontais — 13
Núcleo dos transformadores de acoplamento — 100
Núcleo dos transformadores monofásicos pequenos — 74
Núcleo envolvente e enrolamento tubular duplo, Transformador com — 275, 276

Núcleo envolvente e enrolamento tubular simples — 275, 283
Núcleo envolvido e enrolamento tubular simples — 275, 292
Núcleo para transformadores monofásicos pequenos, Escolha do — 81
Núcleos de transformadores, Constituição dos — 12
Núcleos de transformadores trifásicos — 10
Núcleos envolventes — 12, 265
Núcleos envolvidos — 12, 265
Núcleo espiral — 265
Numeração dos bornes de um transformador — 122
Número de derivações de um transformador — 188
Número de espiras do transformador monofásico pequeno — 82

O

Óleo mineral, Transformadores em — 22, 192, 197, 231

P

Perda a vazio do transformador — 33
Perdas específicas totais no ferro — 26
Perdas no cobre — 43, 53, 67
Perdas no cobre e no ferro de transformadores de grande potência — 205
Perdas no ferro — 24
Perdas no ferro em um transformador de grande potência — 225
Perdas no ferro e no cobre de um transformador trifásico de pequena potência — 113
Perdas no ferro por correntes parasitas — 24
Perdas no ferro por histerese magnética — 25
Peso do cobre de um autotransformador, Economia no — 141
Peso do cobre de um transformador trifásico de pequena potência — 113
Peso do cobre em transformadores de grande potência — 218, 225
Peso do cobre em transformadores monofásicos pequenos — 83
Peso do ferro de um transformador trifásico de pequena potência — 113
Peso do ferro em transformador de grande potência — 219, 225
Peso do ferro em transformadores monofásicos pequenos — 83
Placa de identificação do transformador — 184

- Poder de ruptura da chave de proteção — 136
 Polaridade aditiva — 124
 Polaridade dos transformadores monofásicos — 123
 Polaridade dos transformadores trifásicos — 125
 Polaridade subtrativa — 124
 Possibilidade de execução do transformador monofásico pequeno — 83
 Potência a vazio do transformador — 43
 Potência nominal de um transformador — 180
 Potência nominal por meio de ventilação forçada, Aumento da — 197
 Potência, Perda de — 24
 Potência transformada de um autotransformador — 149
 Potências nominais padronizadas — 180
 Princípio de funcionamento do transformador — 3
 Projeto de autotransformadores trifásicos, Considerações e dados para o — 157
 Projeto de transformadores de pequena potência — 73
 Projeto de um autotransformador, Considerações e dados para o — 149
 Propriedades dos líquidos isolantes — 193
 Relação de fase entre as tensões primárias e secundárias — 123
 Relação entre as correntes primárias e secundárias de um transformador monofásico — 123
 Relação entre os pesos de cobre de um autotransformador e de um transformador normal — 146
 Rendimento do transformador — 22, 69, 205
 Resfriamento a ar — 23, 196, 205, 227
 Resfriamento a ar com ventilação forçada — 230
 Resfriamento com óleo com ventilação natural — 23, 231
 Resfriamento com óleo e serpentina de água interna — 23, 235
 Resfriamento com óleo e ventilação forçada — 23, 231
 Resfriamento dos transformadores — 22
 Resistência equivalente, Determinação experimental da — 54
 Resistência equivalente secundária — 48
 Resistência primária equivalente — 50
 Resistências ôhmicas dos enrolamentos — 37
 Rigidez dielétrica do ar, Fator de correção para a — 201

Q

- Quantidade de calor dissipada em um transformador — 22, 196, 227
 Queda de tensão industrial — 60, 63, 217
 Queda ôhmica primária e secundária — 37

R

- Reatância de dispersão, Cálculo da — 58
 Reatância de dispersão em enrolamentos — 38
 Reatância equivalente secundária — 48
 Reatância primária equivalente — 51
 Regime de funcionamento em paralelo de transformadores de características diferentes — 133
 Regime desequilibrado, Transformadores trifásicos em — 105
 Regulador de tensão com comando automático — 169
 Regulador de tensão com comando manual — 167
 Reguladores de tensão, Exemplos de cálculo dos — 171
 Regulagem da bobina de reatância — 93
 Regulagem da tensão — 188, 190, 191

S

- Seção de cobre enrolado em um transformador monofásico pequeno, Cálculo da — 83
 Seção do núcleo de um transformador de grande potência — 218
 Seção dos condutores em transformadores monofásicos pequenos da — 78
 Seção geométrica do núcleo, Cálculo da — 78
 Seção magnética de um transformador de dois primários e dois secundários — 81
 Seção magnética de um transformador de dois primários e um secundário — 81
 Seção magnética de um transformador de um primário e um secundário — 80
 Seção magnética do núcleo, Cálculo da — 79
 Sistema fechado, Transformadores com transformação trihexafásica com — 139
 STEINMETZ, Fórmula de — 25

T

- Tanque do transformador, Forma do — 193
 Temperatura máxima da água, Refrigerante — 183

- Temperatura máxima do ar ambiente — 182
Tensão de curto-círcuito — 51, 183
Tensão de isolamento, Classes de — 180
Tensão do transformador, Dispositivo de ajuste da — 188, 190
Tensão industrial, Fórmulas práticas para a — 63
Tensão industrial, Queda de — 60, 63, 217
Tensão máxima nos bornes do transformador com corrente constante — 143
Tensão primária — 2
Tensão secundária — 2
Tensões de linha normalizadas — 181
Tensões primárias e secundárias, Relação de fase entre as — 123
Transformação do transformador — 2, 46
Transformação trihexafásica com sistema fechado, Transformadores com — 139
Transformador a carga reduzida e a plena carga — 8
Transformador a vazio e com carga, Diagramas vetoriais do — 40
Transformador, Circuito equivalente do — 46
Transformador com corrente constante — 140
Transformador com corrente constante, Aplicações do — 144
Transformador com dois primários e um secundário, Seção magnética de um — 81
Transformador com entrada trifásica e saída monofásica, Exemplo de cálculo do — 118
Transformador de dois primários e dois secundários, Seção magnética de um — 81
Transformador de um primário e um secundário, Seção magnética de um — 80
Transformador de vapor de mercúrio — 139
Transformador em líquido isolante — 179
Transformador, Funcionamento a vazio — 3, 31
Transformador, Funcionamento com carga do — 5
Transformador ideal — 3
Transformador monofásico de pequena potência, Dados de projeto para — 73
Transformador monofásico em curto-círcuito — 51
Transformador monofásico, Princípio de funcionamento do — 3
Transformador operando a mais de mil metros — 200
Transformador operando com freqüência diferente da nominal — 199
Transformador para estação — 179
Transformador para exterior — 179
Transformador para interior — 179
Transformador para plataforma — 179
Transformador para poste — 179
Transformador seco — 23, 179
Transformador subterrâneo — 179
Transformador trifásico de pequena potência, Cálculo do número de espiras de um — 112
Transformador trifásico de pequena potência, Peso de ferro do — 113
Transformador trifásico de pequena potência, Peso do cobre do — 113
Transformadores com refrigeração natural, Exemplo de cálculo dos — 114
Transformadores de acoplamento, Cálculo dos — 99
Transformadores de acoplamento de audiofreqüência — 100
Transformadores de acoplamento, Exemplo de cálculo de — 101
Transformadores de acoplamento, Freqüências indicadas para — 100
Transformadores de acoplamento, Número dos — 100
Transformadores de acoplamento, Valores necessários ao projeto de — 100
Transformadores de alta tensão — 107
Transformadores de distribuição com núcleo convencional — 275
Transformadores de distribuição com núcleo envolvente — 265
Transformadores de distribuição com núcleo envolvido — 265
Transformadores de distribuição com núcleo espiral — 265
Transformadores de grande potência, Projeto de — 203
Transformadores de mesma potência em paralelo — 132
Transformadores de potência diversa em paralelo — 132
Transformadores elevadores de usinas geradoras — 107
Transformadores em paralelo — 128
Transformadores em paralelo com características diferentes. Determinação do regime de funcionamento dos — 133
Transformadores em paralelo com diferente impedância interna — 135
Transformadores em paralelo com diferente relação de espiras — 133
Transformadores monofásicos de distribuição — 263
Transformadores monofásicos em paralelo, Condições para a ligação de — 130
Transformadores monofásicos, Polaridade de — 123

- Transformadores redutores para redes de distribuição — 106, 109
Transformadores, Rendimento dos — 22, 69
Transformadores resfriados a óleo — 192, 197, 205
Transformadores, Resfriamento dos — 22
Transformador trifásico, Princípio de construção do — 8
Transformadores trifásicos, Correntes a vazio nos — 35
Transformadores trifásicos de pequena potência com refrigeração natural, Considerações para o projeto — 111
Transformadores trifásicos de pequena potência, Determinação das lâminas dos — 112
Transformadores trifásicos em curto-círcuito — 56
Transformadores trifásicos em paralelo, Condições para a ligação de — 131
Transformadores trifásicos em regime desequilibrado — 105
Transformadores trifásicos, Esquemas usados em — 129
Transformadores trifásicos, Polaridade dos — 125
- U**
- Usos do transformador de corrente constante — 144
- V**
- Valor do fluxo no núcleo — 4
Valor eficaz da f.e.m. — 4
Variação da carga do transformador — 7
Ventilação forçada, Aumento da potência nominal por meio da — 197
Ventilação forçada, Transformadores resfriados a ar com — 230
Ventilação forçada, Transformadores resfriados a óleo com — 235
Ventilação natural, Transformadores em óleo com — 231
Ventilação natural, Transformadores resfriados a ar com — 227
Viabilidade de execução de um transformador monofásico pequeno — 83

Este livro foi composto nas oficinas gráficas
da Livraria do Globo S.A. em Porto Alegre e
impresso pela Graphos Industrial Gráfico Ltda.
Rua Santo Cristo, 70/78 — Rio de Janeiro — RJ

EDIÇÃO 2424 A — Para pedidos telegráficos deste livro, basta indicar
o número **2424 A**, antepondo a este número a quantidade desejada. Por
exemplo, para pedir 5 exemplares, é suficiente telegrafar assim: **Dicionário**
— **Porto Alegre — 52424 A**. Desejando-se encomendar 10 ou mais exempla-
res, não é necessário transmitir a letra **A**.



EDITOR A GLOBO