

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PARAÍBA
Campus João Pessoa

Transformadores

Teoria e Projeto



Apostila original por
Prof. Cecil M. Fragoso
Março de 1993

Reedição por
Gabriel Gutierrez P. Soares

Revisão por
Manoel B. Soares

Maio de 2010

Transformadores

1 - Conceito

O transformador é uma máquina elétrica estática que tem como finalidade transferir energia elétrica de um circuito para outro, geralmente com tensões e correntes diferentes, mantendo a mesma frequência e aproximadamente a mesma potência.

2 - Princípio de funcionamento

O funcionamento dos transformadores é baseado no princípio da **indução eletromagnética**, descoberta pelo físico inglês Michael Faraday, em 1831:

Quando a corrente de uma bobina varia, seu campo magnético induz uma força eletromotriz (f.e.m.) numa bobina vizinha.

3 - Elementos constituintes do transformador

O transformador é constituído por:

- Um núcleo de ferro laminado formando um circuito magnético fechado;
- Bobinas primária (que recebe a corrente) e secundária (que fornece a corrente).

4 - Representação simbólica

Os transformadores são representados em esquemas elétricos através de símbolos:

- Em esquemas multifilares (Fig. 1-a e 1-b);

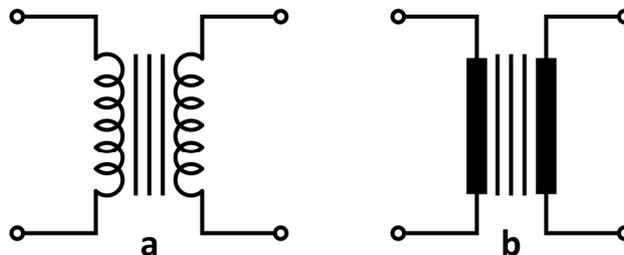


Fig. 1 - Representações esquemáticas multifilares do transformador

- Em esquemas unifilares (Fig. 2-a e 2-b);

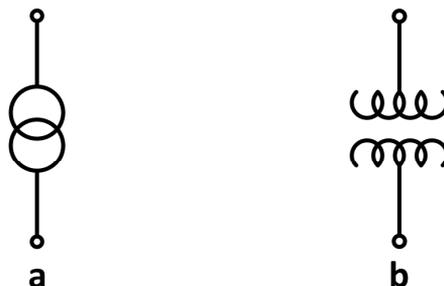


Fig. 2 - Representações esquemáticas unifilares do transformador

5 - Classificações mais comuns de transformadores

- De acordo com a disposição das bobinas no núcleo:

- a) **Núcleo envolvido** (Fig. 3-a);
- b) **Núcleo envolvente**, mais utilizado por apresentar menores perdas por dispersão de fluxo (Fig. 3-b);

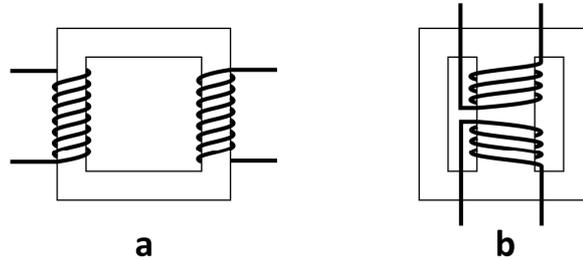


Fig. 3 - Disposição das bobinas

- De acordo com a relação entre as tensões primárias e secundárias:

- a) **Elevadores**, quando a tensão do secundário é maior que a do primário (Fig. 4-a);
- b) **Abaixadores**, quando a tensão do primário é maior que a do secundário (Fig. 4-b);

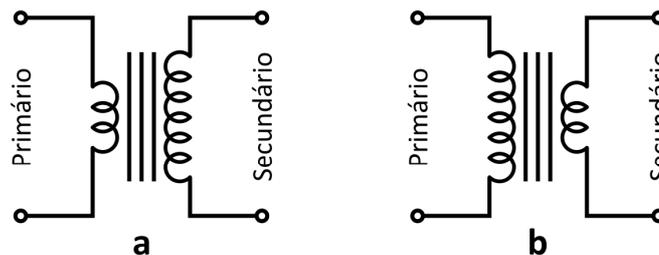


Fig. 4 - Relação entre as bobinas primária e secundária

- De acordo com o tipo de resfriamento:

- a) **A seco**, com ventilação natural ou forçada;
- b) **A óleo**, com ou sem irradiadores;

- De acordo com o número de fases:

- a) **Monofásicos**
- b) **Trifásicos**

- De acordo com a tensão:

- a) **Extra-baixa tensão**, menor que 50V;
- b) **Baixa tensão**, entre 50V e 1kV;
- c) **Média tensão**, entre 1kV e 35kV;
- d) **Alta tensão**, maior que 35kV;

6 - Considerações e dados para projetos de transformadores monofásicos de pequena potência e baixa tensão

a) Condutores, isolamento e disposição das bobinas

Os condutores empregados nos pequenos transformadores são de fio redondo de cobre esmaltado de até #10 AWG, acima disso é preferível o emprego de condutores quadrados ou retangulares. Em certos casos, para facilitar a execução de enrolamento, substituem-se os condutores de elevada seção por dois condutores agrupados em paralelo.

O carretel sobre o qual são enroladas as bobinas é constituído por cartolina isolante, fibra ou teflon.

O enrolamento das bobinas sobre o carretel se processa colocando-se uma folha de papel isolante intercalando entre uma camada e outra de condutores.

A separação entre a bobina primária e a bobina secundária deve ser feita com várias camadas de cartolina ou fibra.

Ao se executar o enrolamento das bobinas é aconselhável enrolar primeiro a bobina de tensão mais elevada, pois esta sendo de fio mais fino, se molda mais às curvas apertadas nos vértices do carretel.

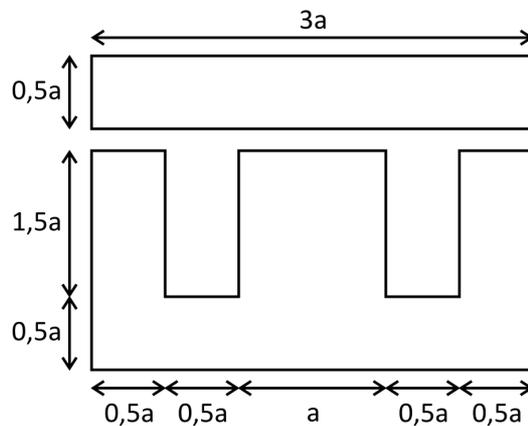


Fig. 5 - Lâminas que constituem o núcleo do transformador

b) Lâminas padronizadas

Em geral o núcleo dos pequenos transformadores é feito com lâminas padronizadas, chamadas de "E" e "I", em virtude do seu formato especial, conforme figura 5.

Todas as dimensões das lâminas "E" e "I" são em função da largura do tronco central, conforme figura 5, e sua montagem na bobina é feita conforme indica a figura 6, em posições alternadas, o que dá ao núcleo mais resistência mecânica e menor relutância magnética.

As lâminas padronizadas para transformadores monofásicos são classificadas por números. Na tabela 1 podem ser vistas as características das lâminas de 0 a 6.

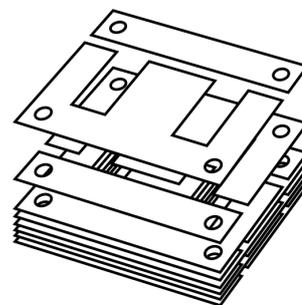


Fig. 6 - Disposição das lâminas no núcleo

Nº	a (cm)	Seção da janela (mm ²)	Massa do núcleo (M _N)
Lâminas padronizadas			
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
Lâminas compridas			
5	4	2400	1,00
6	5	3750	1,58

Tabela 1 – Lâminas padronizadas e compridas

c) Dados para os cálculos

Em geral os valores fornecidos para os cálculos de um transformador monofásico são:

- ✓ P_2 = potência secundária, medida em VA;
- ✓ V_1 = tensão primária;
- ✓ V_2 = tensão secundária;
- ✓ f = frequência;

Alguns fabricantes preferem fornecer a corrente secundária (I_2) ao invés da potência secundária (P_2).

d) Cálculo da potência primária

A potência primária é calculada acrescentando-se à potência secundária 10% do seu valor, a fim de compensar as perdas, isto é,

$$P_1 = P_2 \times 1,1 \text{ [VA]}$$

e) Cálculo das correntes primária e secundária

$$I_1 = P_1/V_1 \quad e \quad I_2 = P_2/V_2$$

f) Cálculo da seção dos condutores

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

Potência (VA)	Densidade de corrente (A/mm ²)
até 500	3
entre 500 e 1000	2,5
entre 1000 e 3000	2

Tabela 2 – Relação entre potência e densidade de corrente

Bons resultados são obtidos quando a densidade de corrente é mantida nos limites indicados na tabela 2.

Fixada a densidade de corrente (d), calcula-se a seção dos condutores através das relações:

$$S_1 = I_1 / d \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S_2 = I_2 / d \text{ [mm}^2\text{]}$$

Estes valores raramente coincidem com os encontrados à venda no mercado. Assim, necessitamos adotar o valor mais próximo, encontrado na tabela 3. Caso a seção seja maior do que 5,26mm² pode-se confeccionar o enrolamento utilizando dois condutores em paralelo, cujas seções somadas dêem o valor aproximado do calculado.

g) Cálculo da seção magnética do núcleo

Num circuito elétrico enrolado sobre ferro existe uma relação de dependência entre a seção do núcleo magnético e o número de espiras dos enrolamentos, isto é, aumentando o núcleo, diminui o número de espiras e vice-versa. Para o emprego de poucas espiras, é necessária a escolha de um núcleo muito grande, o que traria inconveniência no uso do transformador, já que este ocuparia grande espaço físico. Por outro lado, se for escolhido o núcleo pequeno, trará o emprego de muitas espiras, o que provavelmente não caberá na janela do transformador.

O núcleo bem escolhido é aquele que permite o emprego de bobinas que entram justas na janela.

A seção magnética dos transformadores é calculada com as seguintes fórmulas:

Seção em mm ²	Bitola em AWG
5,26	10
4,18	11
3,30	12
2,63	13
2,09	14
1,65	15
1,30	16
1,04	17
0,818	18
0,650	19
0,515	20
0,407	21
0,322	22
0,255	23
0,204	24
0,159	25
0,126	26

Tabela 3 – Relação entre a seção em mm² e a bitola em AWG

Transformadores de um primário e um secundário (Fig. 7-a):

$$S_m = 7,5\sqrt{P_2/f}$$

Lâminas padronizadas

$$S_m = 6\sqrt{P_2/f}$$

Lâminas compridas

- ✓ P_2 = potência secundária em VA (Volt-Ampère);
- ✓ f = frequência em Hz;
- ✓ S_m = seção magnética em mm²;

Transformadores de dois primários e um secundário ou vice-versa (Fig. 7-b e 7-c):

$$S_m = 7,5\sqrt{1,25P_2/f}$$

Lâminas padronizadas

$$S_m = 6\sqrt{1,25P_2/f}$$

Lâminas compridas

Transformadores de dois primários e dois secundários (Fig. 7-d):

$$S_m = 7,5\sqrt{1,5P_2/f}$$

Lâminas padronizadas

$$S_m = 6\sqrt{1,5P_2/f}$$

Lâminas compridas

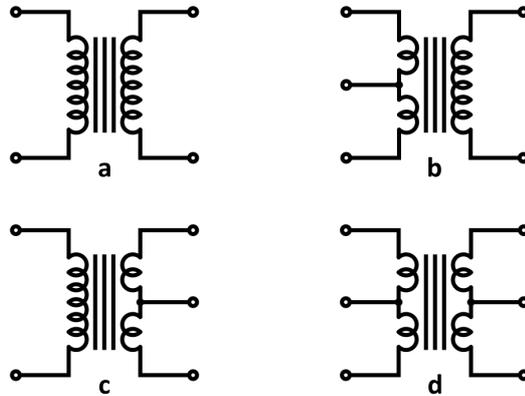


Fig. 7 - Tipos de enrolamento

h) Cálculo da seção geométrica do núcleo

O produto da largura (a) da coluna central do transformador, pelo comprimento (b) do pacote de lâminas, conforme figura 8, corresponde à seção geométrica (S_g) do núcleo, isto é:

$$S_g = a \times b \text{ [cm}^2\text{]}$$

Esta seção não representa, porém, a seção verdadeira do ferro, ou seja, a seção magnética, pois entre uma lâmina e outra existe uma camada de material isolante que não toma parte da formação do fluxo. Assim sendo, a seção geométrica é obtida acrescentando-se 10% ao valor da seção magnética, isto é:

$$S_g = S_m \times 1,1 \text{ [cm}^2\text{]}$$

i) Escolha do núcleo – cálculo de a e b

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

$$a = \sqrt{S_g} \text{ [cm]}$$

Em seguida, é só consultar a tabela 1 e escolher a lâmina cujo valor de a se aproxima mais do calculado.

O comprimento b é dado pela fórmula:

$$b = S_g / a \text{ [cm]}$$

Onde o a é obtido a partir da tabela 1.

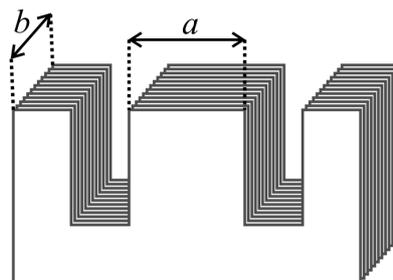


Fig. 8 - Medidas da seção geométrica do núcleo

j) Cálculo do número de espiras

- Espiras primárias (N_1):

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

- ✓ V_1 = tensão primária em volts;
- ✓ B_m = indução magnética máxima do ferro em Gauss (G) ¹;
- ✓ S_m = seção magnética do núcleo em cm²;
- ✓ f = frequência em Hz.

A fórmula anterior pode ser escrita da seguinte forma:

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

Para $f = 60 \text{ Hz}$ e $B_m = 12.000 \text{ G}$, temos:

$$N_1 = V_1 \times \frac{31,281}{S_m}$$

- Espiras secundárias (N_2)

Para o cálculo das espiras secundárias, emprega-se a mesma fórmula, substituindo V_1 por V_2 e acrescentando 10% ao resultado, para compensar alguma perda na tensão secundária, ou seja:

$$N_2 = V_2 \times \frac{31,281}{S_m} \times 1,1$$

l) Possibilidade de execução

Para que as bobinas possam entrar na janela e a montagem do transformador seja possível, é preciso que se verifique:

$$\frac{\text{Seção da janela}}{\text{Seção do cobre}} = \frac{S_j}{S_{Cu}} \geq 3 \quad , \text{ ou seja, } \quad \frac{S_j}{N_1 S_1 + N_2 S_2} \geq 3$$

Onde a seção da janela é obtida a partir da tabela 1. Se esta relação for menor que 3, é preciso recalcular o transformador com um núcleo maior ou formato diferente (lâmina comprida).

¹ Este valor varia entre 8.000 e 14.000 Gauss. Para lâminas de ferro silício de boa qualidade, com resfriamento natural, $B_m = 11.500 \text{ G}$.

m) Massa do ferro

A massa do núcleo é calculada pela fórmula:

$$M_{Fe} = M_N \times b$$

- ✓ M_{Fe} = massa do ferro, em kg;
- ✓ M_N = massa por unidade de comprimento do núcleo (*tabela 1*), em kg/cm;
- ✓ b = comprimento do núcleo, em cm;

n) Massa do cobre

Para o enrolamento da bobina de fio mais fino, também chamado de **enrolamento de alta tensão (AT)**, temos:

$$M_{CuAT} = L_{mAT} \times \frac{S_{CuAT}}{100} \times 8,9 = (2a + 2b + 0,25a\pi) \times \frac{N_{AT} \cdot S_{AT}}{100} \times 8,9 \quad [g]$$

- ✓ M_{CuAT} = massa do cobre da bobina AT, em g;
- ✓ L_{mAT} = comprimento da espira média da bobina AT, em cm;
- ✓ S_{CuAT} = seção total do cobre da bobina AT, em **mm²**;
- ✓ N_{AT} = número de espiras do enrolamento AT;
- ✓ S_{AT} = seção do condutor da bobina AT, em **mm²**;
- ✓ 8,9 = valor da massa específica do cobre, em g/cm³;

Para o enrolamento da bobina de fio mais grosso - **enrolamento de baixa tensão (BT)** - temos:

$$M_{CuBT} = L_{mBT} \times \frac{S_{CuBT}}{100} \times 8,9 = (2a + 2b + 0,75a\pi) \times \frac{N_{BT} \cdot S_{BT}}{100} \times 8,9 \quad [g]$$

- ✓ M_{CuBT} = massa do cobre da bobina BT, em g;
- ✓ L_{mBT} = comprimento da espira média da bobina BT, em cm;
- ✓ S_{CuBT} = seção total do cobre da bobina BT, em **mm²**;
- ✓ N_{BT} = número de espiras do enrolamento BT;
- ✓ S_{BT} = seção do condutor da bobina BT, em **mm²**;