

Transformadores

6

TRANSFORMADORES

6.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Núcleo: Confeccionado com chapas de Aço-Silício laminado, empilhadas e prensadas, as quais apresentam permeabilidades magnéticas elevadas.

Enrolamentos: Confeccionados com material condutor de alta condutividade, normalmente cobre, envernizados e isolados do núcleo.

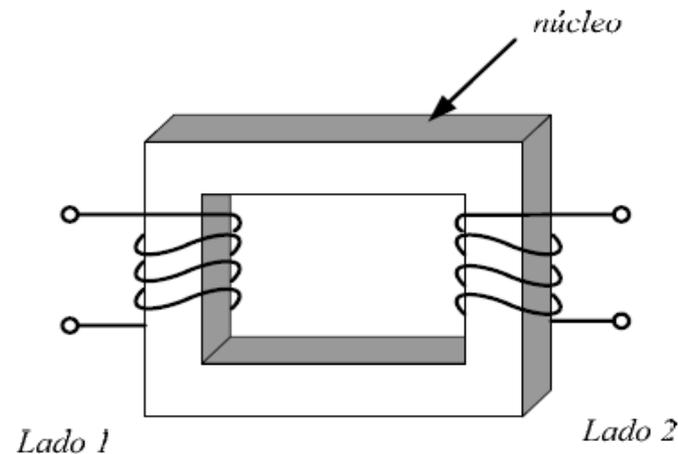


Figura 6 1. Transformador

Os enrolamentos do transformador são diferentes. O lado 1, normalmente denominado “primário”, apresenta N_1 espiras e o do lado 2, denominado “secundário”, possui N_2 espiras.

6.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

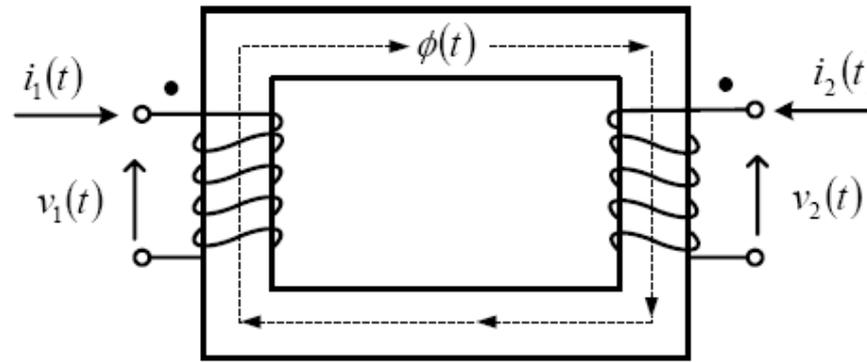


Figura 6 2. Convenções

Grandezas envolvidas:

$v_1(t)$: Tensão no primário, normalmente imposta pela fonte;

$v_2(t)$: Tensão no secundário;

$i_1(t)$: Corrente no primário;

$i_2(t)$: Corrente no secundário;

ϕ : Fluxo magnético mútuo aos dois enrolamentos.

Conceito de Polaridade: “Dois terminais de bobinas distintas, magneticamente acopladas, apresentam mesma polaridade quando correntes elétricas, entrando simultaneamente por esses terminais, produzirem fluxos magnéticos concordantes”.

Obs.: terminais de mesma polaridade são ident. pelo mesmo símbolo (ex.: ponto).

CIRCUITO MAGNÉTICO DO TRANSFORMADOR

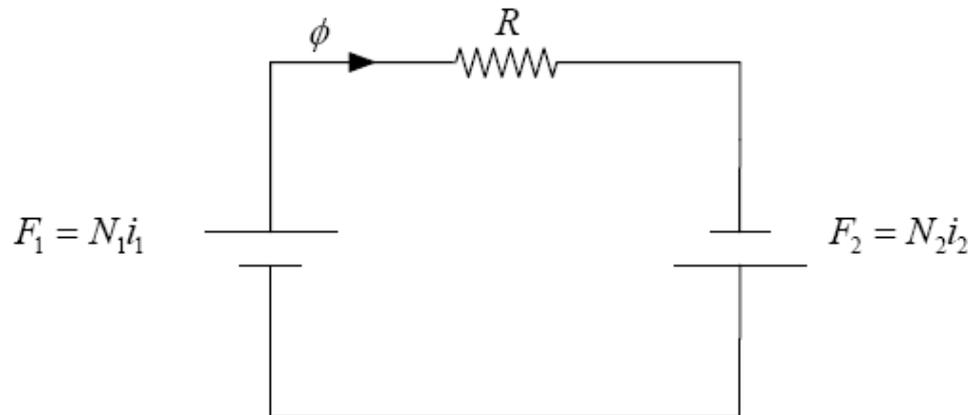


Figura 6 3. Circuito Elétrico Análogo

Da análise do circuito elétrico análogo determina-se:

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = R \phi$$

Grandezas envolvidas

$F_1 = N_1 i_1$: Força magnetomotriz (f.m.m.) do Primário [Aesp];

$F_2 = N_2 i_2$: Força magnetomotriz (f.m.m.) do Secundário [Aesp];

ϕ : Fluxo magnético mútuo aos dois enrolamentos [Wb];

$R = \frac{1}{\mu} \frac{L}{S}$: Relutância do Circuito Magnético [Aesp/Wb].

O TRANSFORMADOR IDEAL

Características:

I – Núcleo com permeabilidade magnética infinita

$$R = \frac{1}{\mu} \frac{L}{S}$$

Conseqüência: A relutância é nula e portanto todo o fluxo magnético está confinado no núcleo.

II – Material condutor das bobinas de condutividade infinita.

Conseqüência: As resistências próprias das bobinas são nulas.

Destas considerações obtém-se:

$$\begin{array}{l} N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0 \\ \frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -\frac{1}{a} \end{array}$$

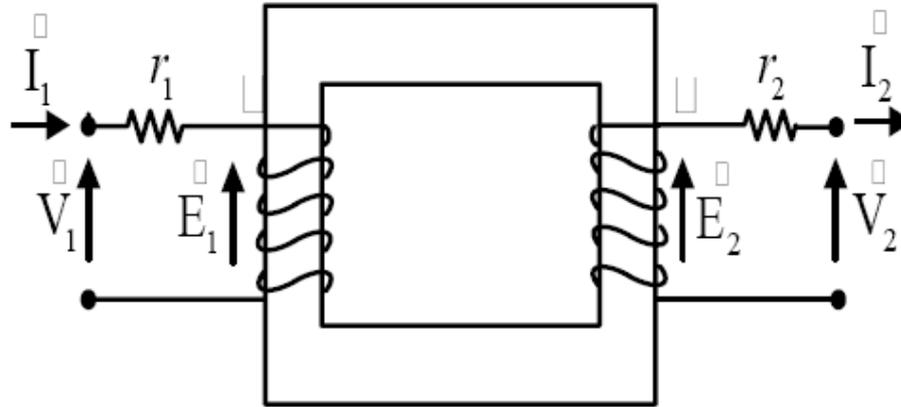
Da lei de Faraday resultam:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ :f.e.m. induzida no primário;}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \text{ :f.e.m. induzida no secundário.}$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

O TRANSFORMADOR IDEAL



Da aplicação da segunda lei de Kirchoff obtém-se:

$$\text{No primário: } V_1 = r_1 i_1 + e_1$$

$$\text{No secundário: } V_2 = r_2 i_2 + e_2$$

Como $r_1 = r_2 = 0$ resulta:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{e_1}{e_2} = a$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} : \text{Relação de Transformação}$$

POTÊNCIA ELÉTRICA INSTANTÂNEA

A potência elétrica instantânea no primário é dada por:

$$p_1 = v_1 i_1$$

A potência elétrica instantânea no secundário é dada por:

$$p_2 = v_2 i_2$$

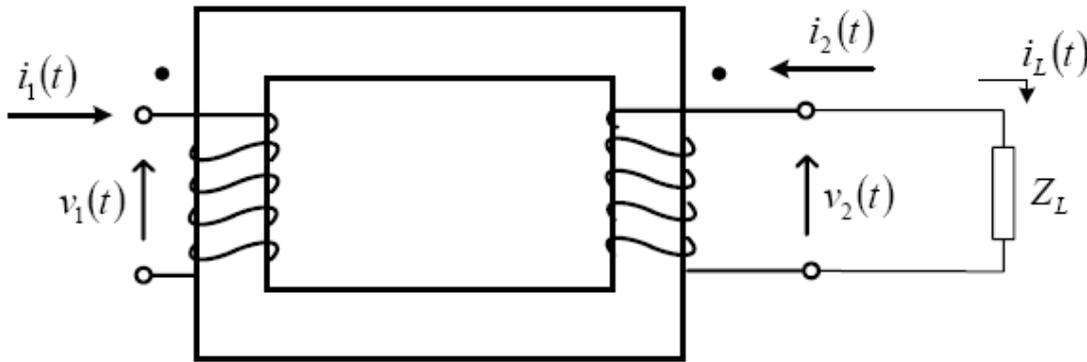
Relação entre as potências elétricas instantâneas:

$$p_1 = v_1 i_1 = (av_2) (-i_2/a) = -v_2 i_2 = -p_2$$

CONCLUSÕES:

1. Para os terminais de mesma polaridade de um transformador ideal, os sentidos dos fluxos de correntes são opostos;
2. A quantidade de potência (ou energia) que entra por um dos lados é a mesma que sai pelo outro lado, isto é, o rendimento do transformador ideal é 100%.

TRANSFORMADOR EM CARGA



Grandezas envolvidas: $v_1(t)$

$v_1(t)$: Tensão no primário,
normalmente imposta pela fonte;

$v_2(t)$: Tensão no secundário;

$i_1(t)$: Corrente no primário;

$i_2(t)$: Corrente no secundário;

$i_L(t) = -i_2(t)$: Corrente na carga;

Z_L : Impedância da carga [Ω].

Relações Importantes

$$\begin{aligned} \frac{v_1}{v_2} &= \frac{e_1}{e_2} = a \\ \frac{i_1}{i_L} &= \frac{1}{a} \\ v_2 &= Z_L i_L \end{aligned}$$

Pode-se escrever: $\frac{v_1}{a} = Z_L (a i_1)$



$$v_1 = a^2 Z_L i_1$$

Fazendo $Z'_L = a^2 Z_L$ resulta:

$$v_1 = Z'_L i_1 \text{ ou } \frac{v_1}{i_1} = Z'_L$$

CONCLUSÃO: Uma impedância Z_L conectada no secundário é “vista” pelo primár com um valor igual a $Z'_L = a^2 Z_L$.

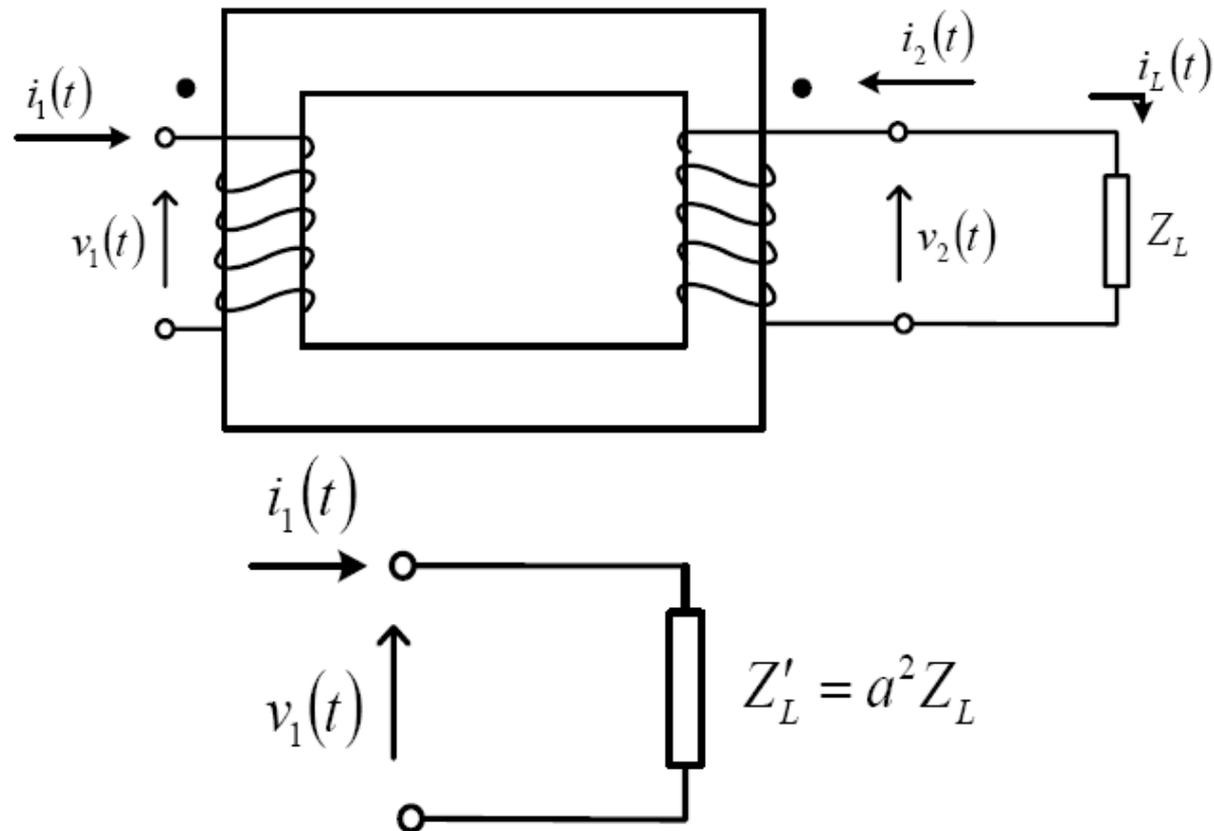
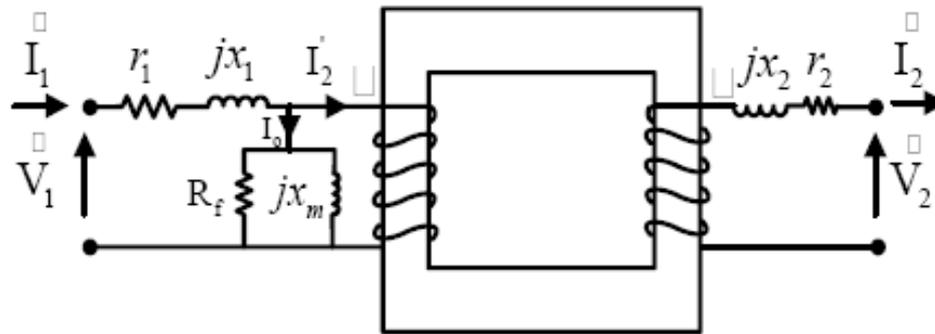


Figura 5: Reflexão de impedâncias

O conjunto transformador ideal alimentando uma carga de impedância Z_L é equivalente a uma carga $Z'_L = a^2 Z_L$ alimentada diretamente pela fonte

6.5. O CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR REAL



“Refletindo” o circuito do secundário para o primário, resulta o circuito equivalente do transformador real mostrado na Figura 17.

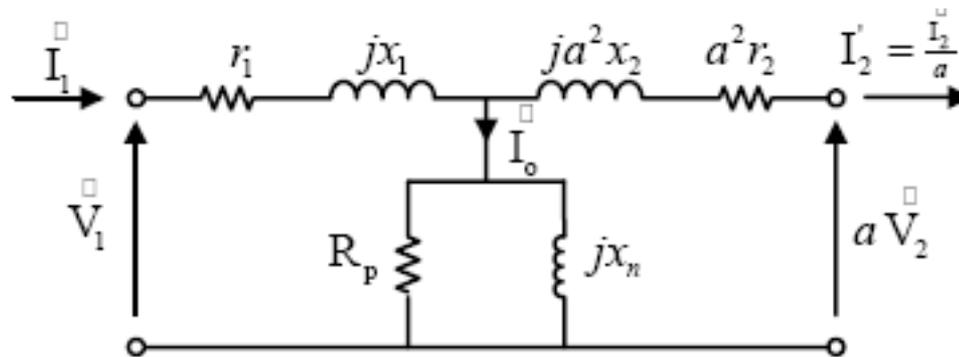
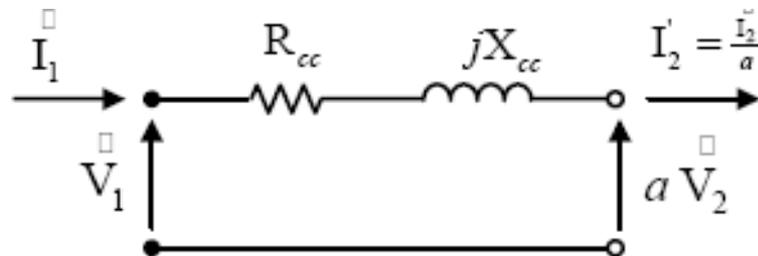


Figura 17 – Circuito equivalente do transformador real

6.5.4. SIMPLIFICAÇÕES DO CIRCUITO EQUIVALENTE



$$R_{cc} = r_1 + a^2 r_2$$

$$X_{cc} = x_1 + a^2 x_2$$

Figura 18 – Circuito elétrico equivalente simplificado

OBS.: Neste circuito considera-se a impedância de magnetização infinitamente maior que as demais impedâncias do transformador

Desprezando as resistências dos enrolamentos, chega-se ao mais simples dos circuitos equivalentes:

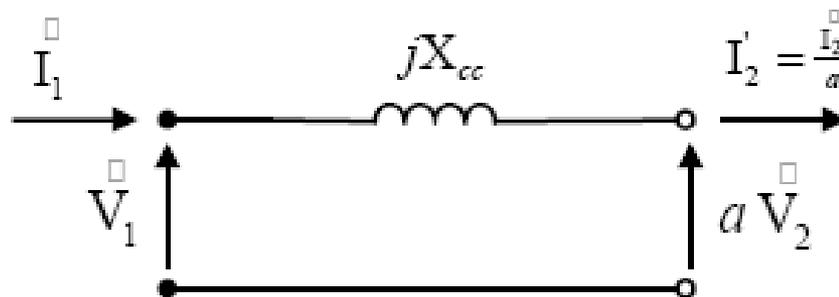


Figura 19 – Circuito Equivalente simplificado

6.5.5. VALORES POR UNIDADE

Os principais parâmetros e grandezas de um transformador são freqüentemente representados como uma fração dos seus valores nominais.

Ex.: transformador de 100 kVA alimenta carga que absorve 20 kVA => a carga está absorvendo 20% da potência nominal ou 0,2 p.u. (por unidade).

Definem-se **Grandezas de Base**, a partir das quais todas as outras são medidas.

Para o primário do transformador são:

Potência de base= Potência Nominal, isto é: $S_B = S_{NOM}$

Tensão de base= Tensão Nominal do Primário, isto é: $V_{B1} = V_{NOM1}$

Para o secundário:

Potência de base = Potência Nominal, isto é: $S_B = S_{NOM}$

Tensão de Base = Tensão Nominal do Secundário: $V_{B1} = V_{NOM1}$

A partir destas grandezas, podemos deduzir as demais grandezas de base que são a corrente e a impedância de base, como seguem:

6.5.5. VALORES POR UNIDADE

A partir destas grandezas, podemos deduzir as demais grandezas de base que são a corrente e a impedância de base, como seguem:

Para o Primário:

Corrente de base:

$$I_{B1} = \frac{S_{NOM}}{V_{NOM1}}$$

Impedância de base:

$$Z_{B1} = \frac{V_{NOM1}}{I_{NOM1}} = \frac{V_{NOM1}^2}{S_{NOM}}$$

Para o secundário:

Corrente de base:

$$I_{B2} = \frac{S_{NOM}}{V_{NOM2}}$$

Impedância de base:

$$Z_{B2} = \frac{V_{NOM2}}{I_{NOM2}} = \frac{V_{NOM2}^2}{S_{NOM}}$$

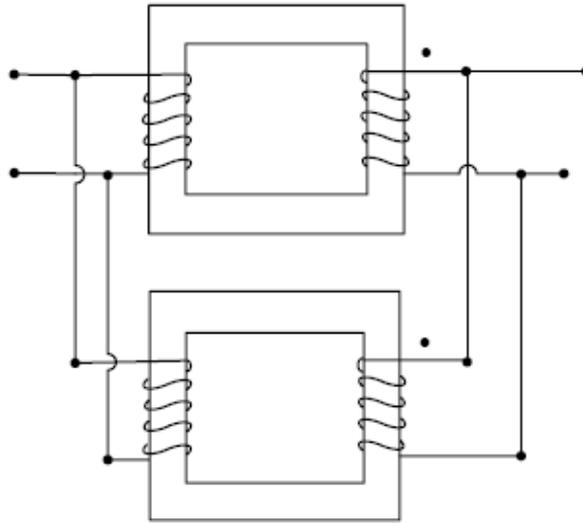
Note que é válida a relação: $Z_{B1} = a^2 Z_{B2}$

6.6. ASSOCIAÇÃO DE TRANSFORMADORES

6.6.1. ASSOCIAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM PARALELO

“Bancos de Transformadores” => desejável (R_{cc} e X_{cc}) iguais em p.u.

- Cuidado com as polaridades!



6.6.2. BANCO TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES

- Vantagem => Menor custo
- Desvantagem => Menor flexibilidade (em caso de defeito: >facilidade de substituição de um monofásico e cargas podem ser parcialmente atendidas em alguns casos)

Conexões Estrela e Triângulo

6.6.2.1. Conexão Estrela-Estrela

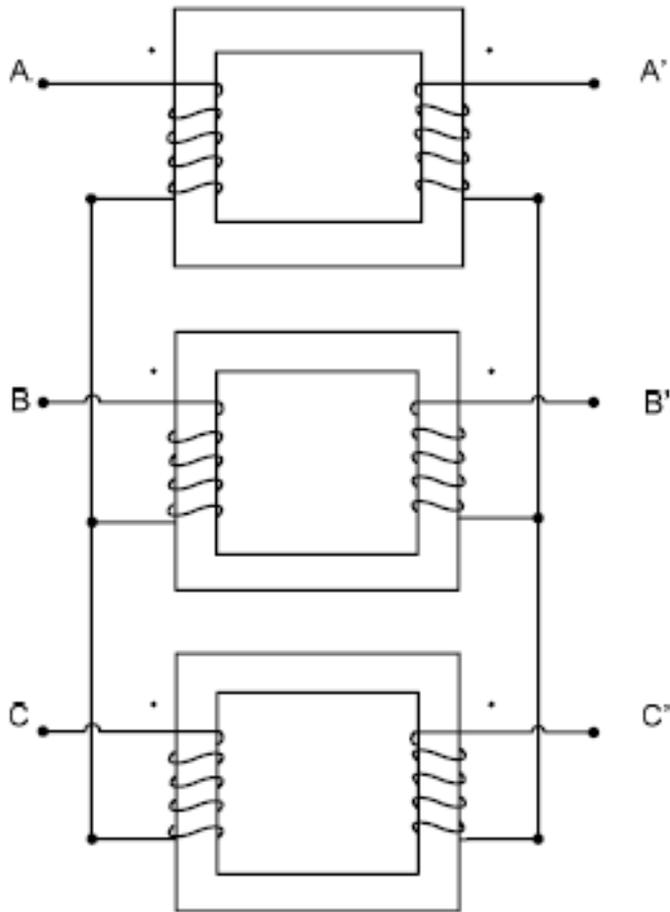


Figura 25 – Banco trifásico estrela – estrela

O único cuidado nesta conexão é observar que os terminais da estrela são os terminais de mesma polaridade das unidades monofásicas.

Sejam os valores do transformador monofásico:

S_{NOM} : Potência nominal;

V_{NOM1} : Tensão nominal do primário;

V_{NOM2} : Tensão nominal do secundário

Os valores nominais do banco trifásico de transformadores resultam:

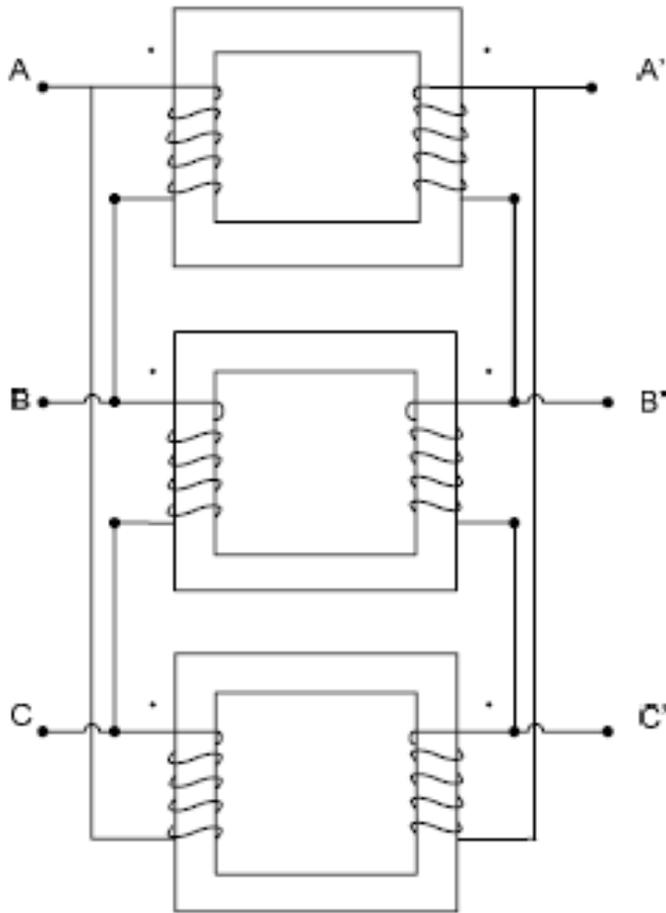
Potencia nominal do banco: $S_{\text{BANCO}} = 3 \times S_{\text{NOM}}$

Tensão nominal de linha do primário: $V_{\text{B1}} = \sqrt{3} \times V_{\text{NOM1}}$

Tensão nominal de linha do secundário: $V_{\text{B2}} = \sqrt{3} \times V_{\text{NOM2}}$

Conexões Estrela e Triângulo

6.6.2.1. Conexão Triângulo-Triângulo



Os valores nominais deste banco trifásico de transformadores resultam:

$$\text{Potencia nominal do banco: } S_{\text{BANCO}} = 3 \times S_{\text{NOM}}$$

$$\text{Tensão nominal de linha do primário: } V_{B1} = V_{\text{NOM1}}$$

$$\text{Tensão nominal de linha do secundário: } V_{B2} = V_{\text{NOM2}}$$

Figura 26 – Conexão triângulo - triângulo

Conexões Estrela e Triângulo

6.6.2.1. Conexão Estrela-Triângulo

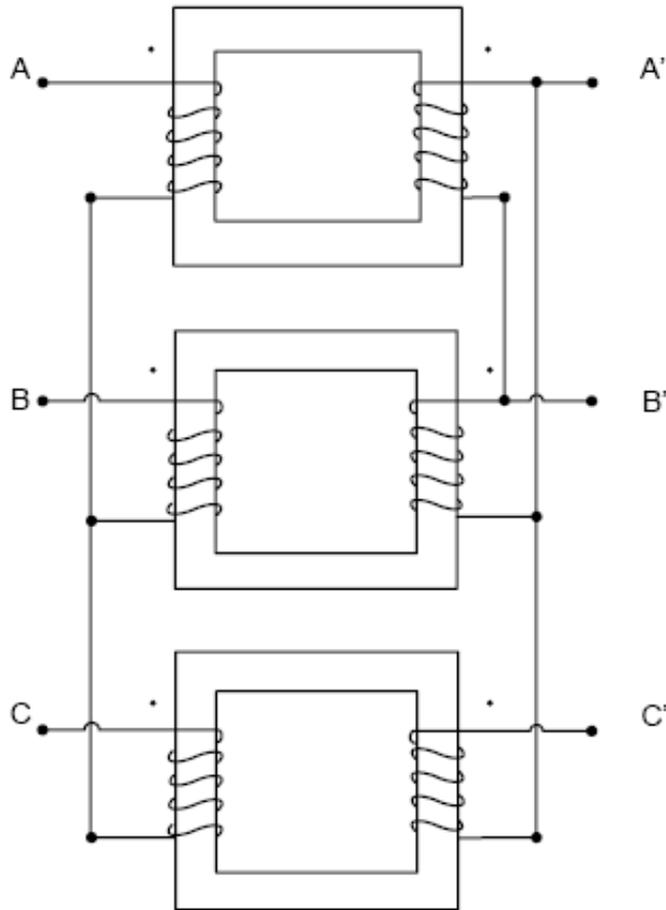


Figura 27 – Conexão estrela - triângulo

Os valores nominais deste banco trifásico de transformadores resultam:

Potencia nominal do banco: $S_{\text{BANCO}} = 3 \times S_{\text{NOM}}$

Tensão nominal de linha do primário: $V_{B1} = \sqrt{3} \times V_{\text{NOM1}}$

Tensão nominal de linha do secundário: $V_{B2} = V_{\text{NOM2}}$

Transformadores Trifásicos

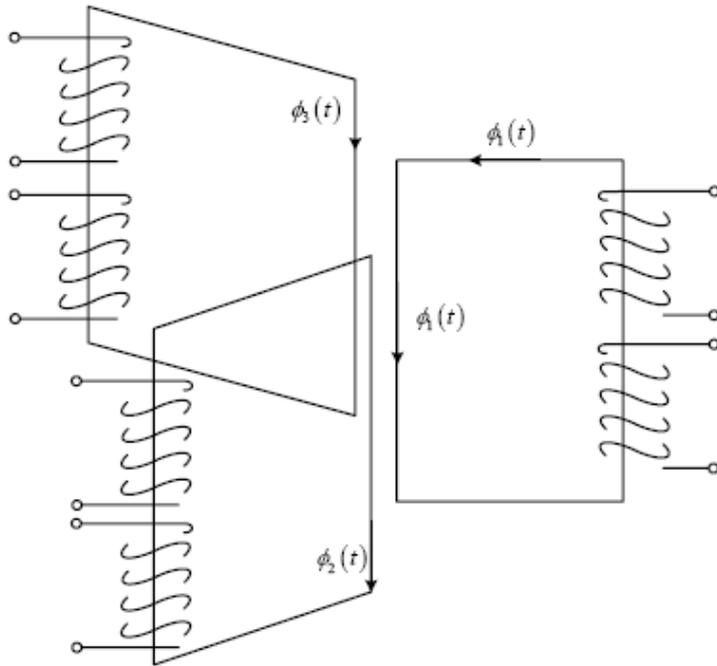


Figura 31 – Três transformadores monofásicos

$$\begin{aligned}\phi_1(t) &= \phi_{\text{MAX}} \cos[\omega t] \\ \phi_2(t) &= \phi_{\text{MAX}} \cos[\omega t - 120^\circ] \\ \phi_3(t) &= \phi_{\text{MAX}} \cos[\omega t - 240^\circ]\end{aligned}$$

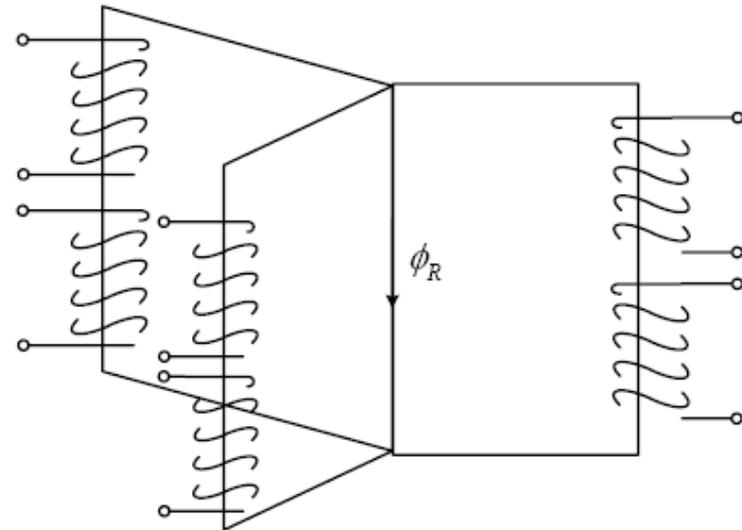


Figura 32 – Três transformadores com um braço comum

$$\phi_R = \phi_1(t) + \phi_2(t) + \phi_3(t) = 0$$

Transformadores Trifásicos

- Para se chegar ao transformador trifásico como ele é construído, colocam-se os três braços em um único plano.
- A pequena diferença de relutância do circuito magnético das três fases não é relevante a ponto de produzir desequilíbrios sensíveis de f.e.m.'s induzidas

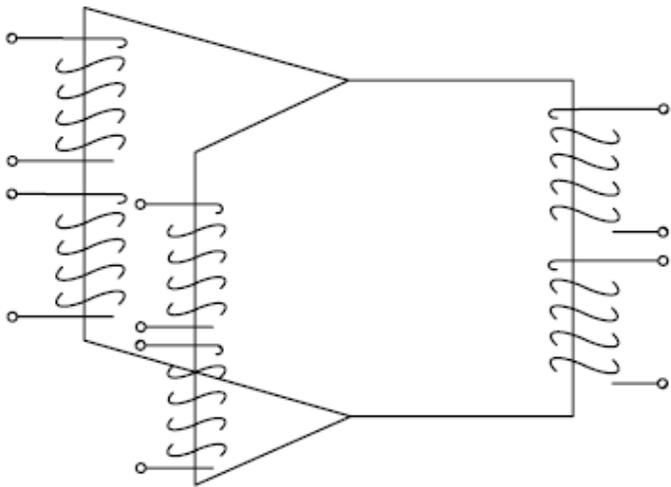


Figura 33 – Três transformadores com o braço comum eliminado

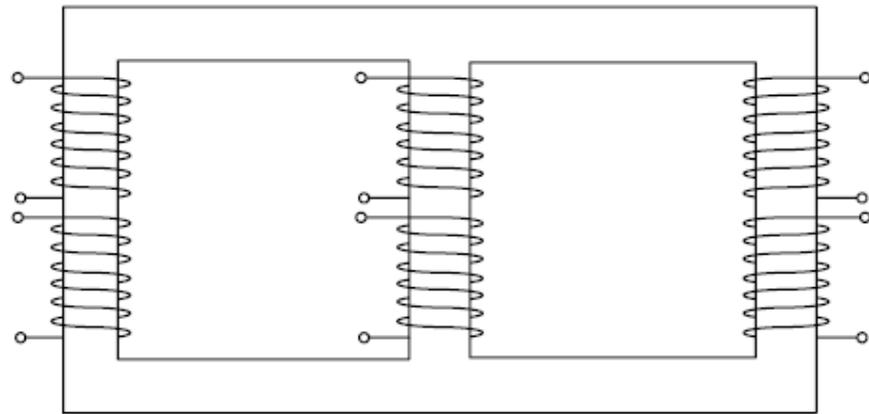


Figura 34 – Transformador Trifásico

Exercícios

1) Um transformador ideal com $N_1 = 500$ esp. e $N_2 = 50$ esp. alimenta uma carga com $R = 20 \Omega$ no secundário. A tensão de alimentação pelo primário é de 300 V.

Pede-se:

a) A tensão na carga

b) Correntes no primário e secundário

c) As potências no primário e secundário.

Exercícios

1) Um transformador ideal com $N_1 = 500$ esp. e $N_2 = 50$ esp. alimenta uma carga com $R = 20 \Omega$ no secundário. A tensão de alimentação pelo primário é de 300 V.

Pede-se:

a) A tensão na carga

$$a = N_1/N_2 = 500/50 = 10;$$

$$V_2 = V_1/a = 300/10 = 30 \text{ V}$$

b) Correntes no primário e secundário

$$I_2 = V_2/R = 30/20 = 1,5 \text{ A};$$

$$I_1 = I_2/a = 0,15 \text{ A}$$

c) As potências no primário e secundário.

$$P_1 = V_1 * I_1 = 300 * 0,15 = 45 \text{ W};$$

$$P_2 = V_2 * I_2 = 30 * 1,5 = 45 \text{ W}$$

Exercícios

2) Determinar o circuito equivalente de um transformador, referido ao primário e ao secundário, desprezando as perdas no ferro e conhecendo os seguintes dados.

Lado da alta tensão: $X_1 = 8 \Omega$, $R_1 = 1,9 \Omega$.

Lado da baixa tensão: $X_2 = 0,10 \Omega$, $R_2 = 0,03 \Omega$.

Reatância de magnetização vista pela alta tensão: $X_m = 70 \text{ k}\Omega$

$N_1 = 1000 \text{ esp.}$, $N_2 = 50 \text{ esp.}$

Exercícios

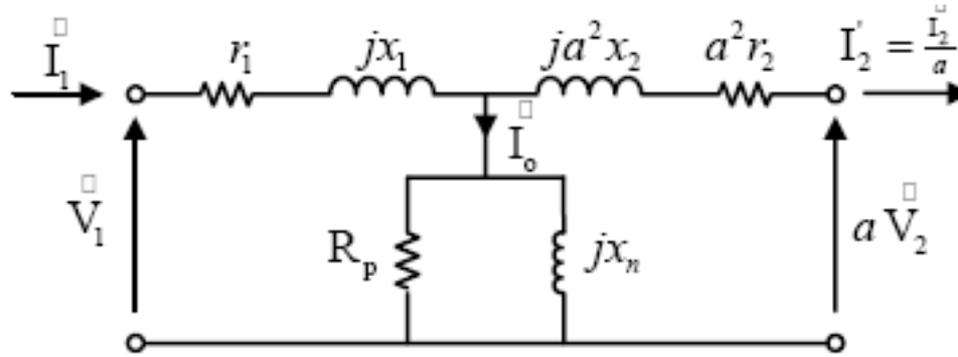
2) Determinar o circuito equivalente de um transformador, referido ao primário e ao secundário, desprezando as perdas no ferro e conhecendo os seguintes dados.

Lado da alta tensão: $X_1 = 8 \Omega$, $R_1 = 1,9 \Omega$.

Lado da baixa tensão: $X_2 = 0,10 \Omega$, $R_2 = 0,03 \Omega$.

Reatância de magnetização vista pela alta tensão: $X_m = 70 \text{ k}\Omega$

$N_1 = 1000 \text{ esp.}$, $N_2 = 50 \text{ esp.}$



Resp.:

$$a = N_1/N_2 = 1000/50 = 20$$

No lado da alta tensão:

$$X_2' = a_2 * X_2 = 400 * 0,10 = 40 \Omega$$

$$R_2' = a_2 * R_2 = 400 * 0,03 = 12 \Omega$$

No lado da baixa tensão:

$$X_1' = X_1/a_2 = 8/400 = 0,02 \Omega$$

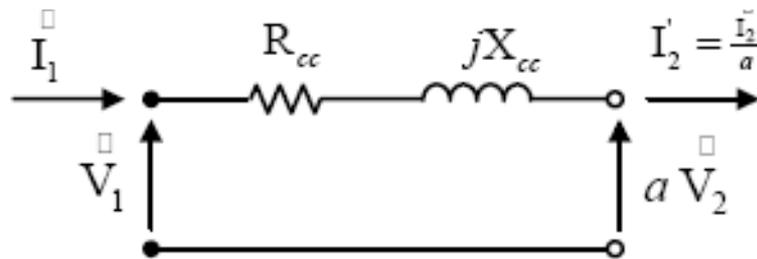
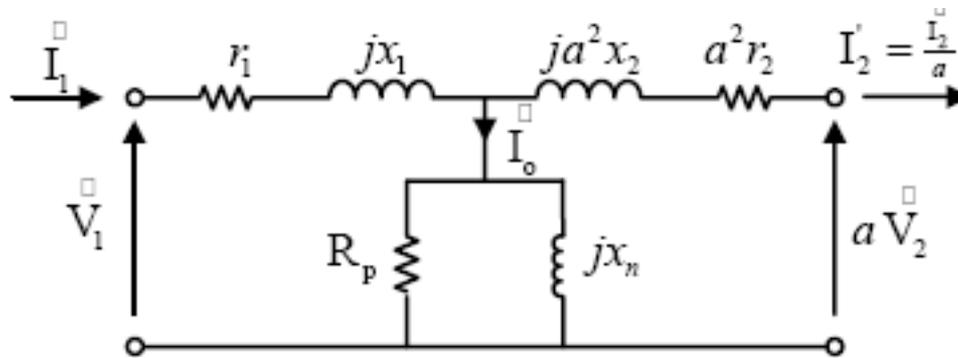
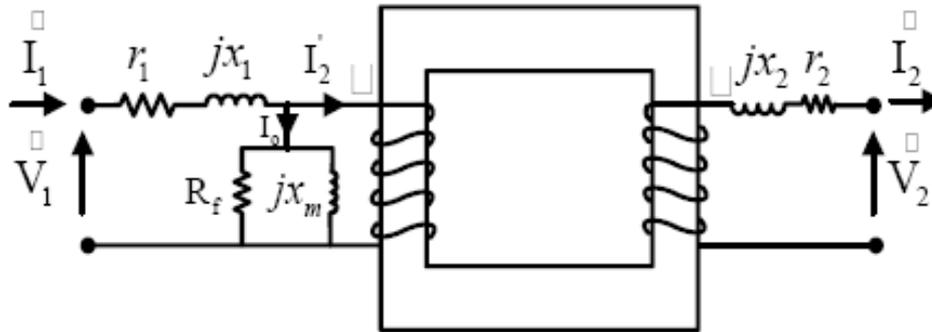
$$R_2' = a_2 * R_2 = 1,9/400 = 0,00475 \Omega$$

$$X_m' = 70000/400 = 175 \Omega$$

Exercícios

- 3) Um transformador apresenta as seguintes características: $Z_1 = (1,9 + j23) \Omega$; $Z_2 = (0,00144 + j0,01744) \Omega$
Tensões nominais: 13800/ 380 V; Potência nominal : 300 kVA
Com uma carga ligada no lado de baixa tensão absorvendo 280 kVA com tensão nominal, fator de potência 0,85 indutivo, calcular:
- as tensões, no primário e no secundário;
 - as correntes no primário e no secundário;
 - potências no primário e no secundário;
 - o rendimento do transformador.

Exercícios



$$Z_{cc} = Z_1 + Z_1' = Z_1 + Z_2^* a^2$$

$$R_{cc} = r_1 + a^2 r_2$$

$$X_{cc} = x_1 + a^2 x_2$$

$$a = 13800/380 = 36,316 \Rightarrow a^2 = 1318,837$$