



Conversão de Energia I

Capitulo 3 –
Transformadores de
Energia

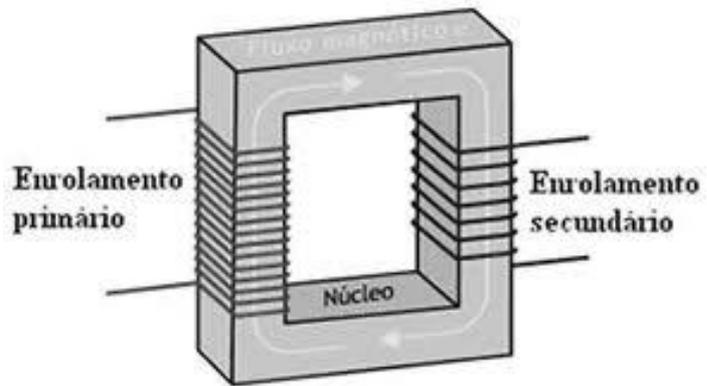
1. Introdução

- O estudo de transformadores permite compreender como a energia elétrica pode ser transportada de um circuito elétrico a outro através do acoplamento de um campo magnético variável no tempo, estando os dois circuitos isolados eletricamente;
- Além de transferir energia, esse dispositivo permite transformar (abaixar ou elevar) tensões, correntes e impedâncias;

- Dentre as principais funções de um transformador podemos listar:
 - Isolar eletricamente dois circuitos;
 - Ajustar a tensão de saída de um estágio do sistema para a tensão de entrada do seguinte;
 - Ajustar a impedância do estágio seguinte à impedância do estágio anterior (casamento de impedâncias).

2. Aspectos construtivos

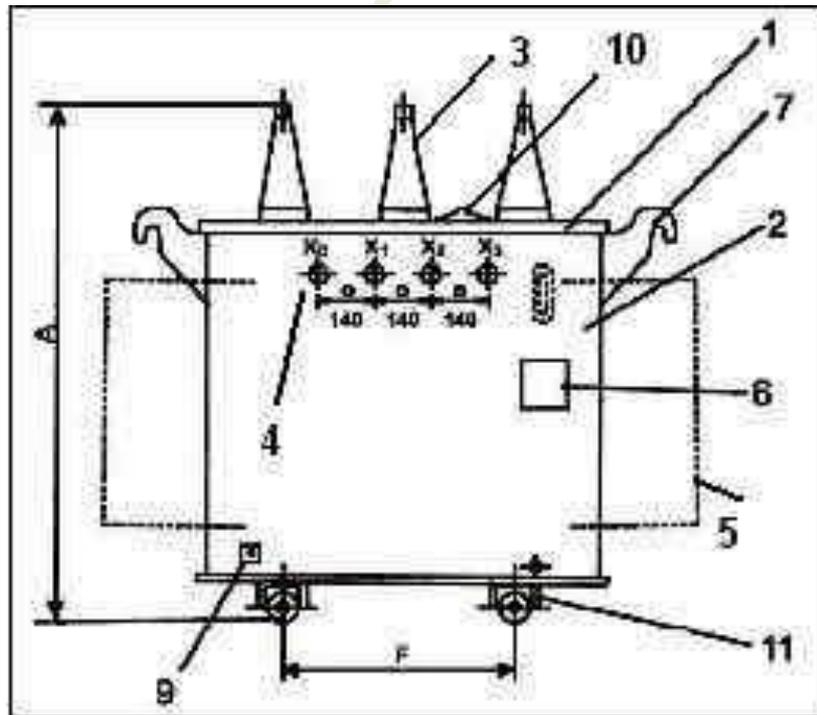
- Um transformador consiste de duas ou mais bobinas e um "caminho", ou circuito magnético, que "acopla" essas bobinas, conforme esquematizado na figura a seguir. Nessa figura, o transformador possui apenas duas bobinas, ou enrolamentos, e o núcleo não possui entreferros, correspondendo a um circuito magnético fechado. Essa corresponde à configuração clássica para estudo de transformadores monofásicos e será a adotada neste curso.







gnéticos



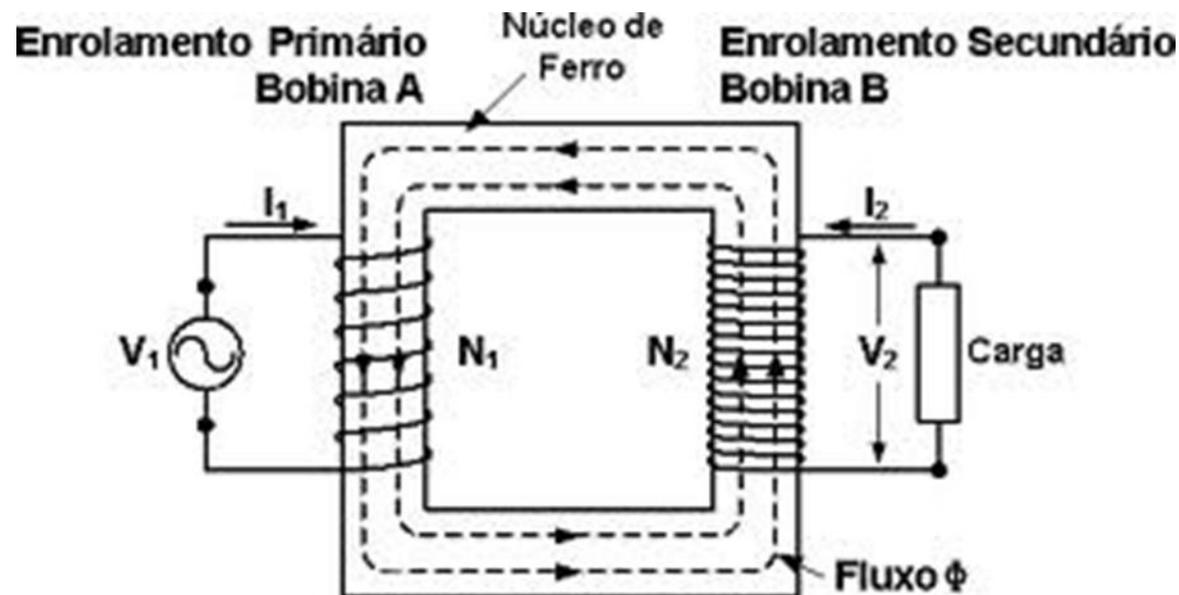
- 1 - Tampa
- 2 - Tanque
- 3 - Isolador A. T. 15 kV - ou 25/160 A
- 4 - Isolador B. T. 1,3 kV
- 5 - Radiadores
- 6 - Placa
- 7 - Suspensão do trafo
- 8 - Fixação da tampa
- 9 - Aterramento p/ cabo 10 a 70 mm²
- 10 - Tampa de inspeção
- 11 - Base p/ rodas bi-direcionais

Elementos de um transformador

Domínios Magnéticos

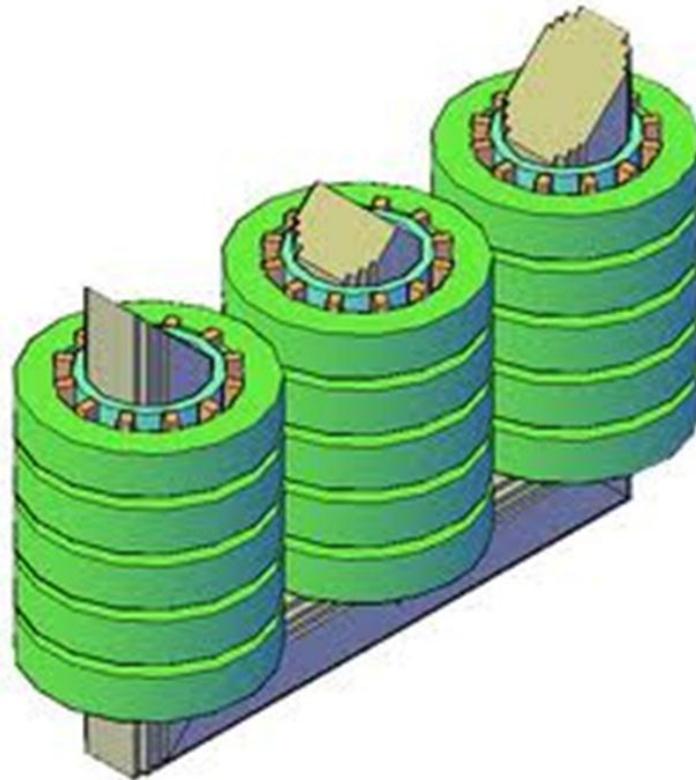
1. Um enrolamento de entrada, chamado de **primário**, que recebe a energia elétrica do sistema e que pode ser tanto de alta como de baixa tensão.
2. Um enrolamento de saída, chamado **secundário**, que entrega a energia à carga conectada aos seus terminais e que também pode ser tanto de alta quanto de baixa tensão. Pode ainda haver mais um enrolamento no secundário conectado várias cargas diferentes.

3. Um **núcleo magnético**, composto normalmente de um material ferromagnético, compõe o circuito magnético do mesmo, sendo responsável pelo acoplamento magnético da máquina.

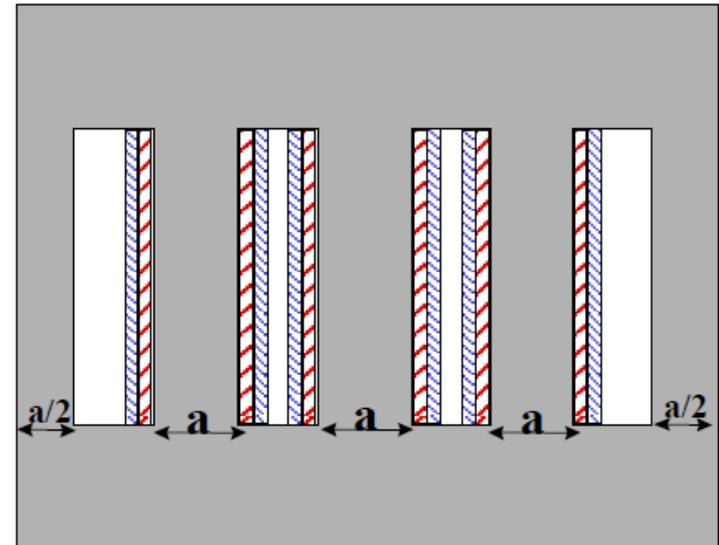
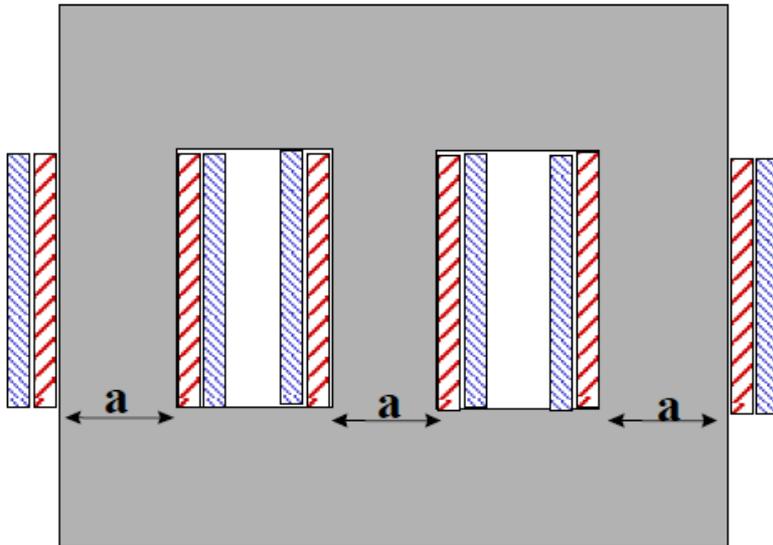


- Transformadores de potência são destinados primariamente à transformação de tensão e operam com correntes relativamente altas;
- Geralmente o núcleo de aço dos transformadores é laminado para reduzir a indução de correntes no próprio núcleo, já que essas correntes contribuem para o surgimento de perdas por aquecimento devido ao efeito Joule;
- Em geral se utiliza aço-silício com o intuito de se aumentar a resistividade e diminuir ainda mais essas correntes parasitas.

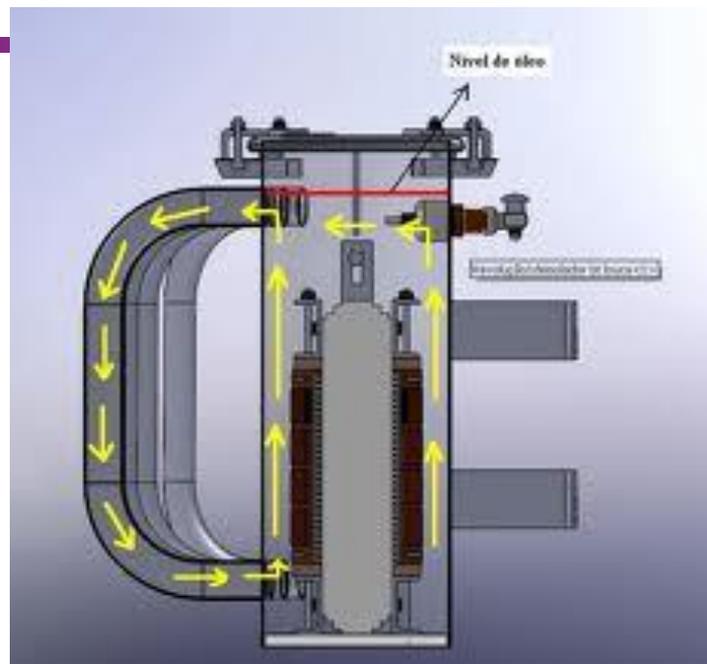
- Para os trafos de potência trifásicos o núcleo é constituído de três braços, cada um deles com dois enrolamentos, conforme a figura. São chamados enrolamentos trifásicos concêntricos;



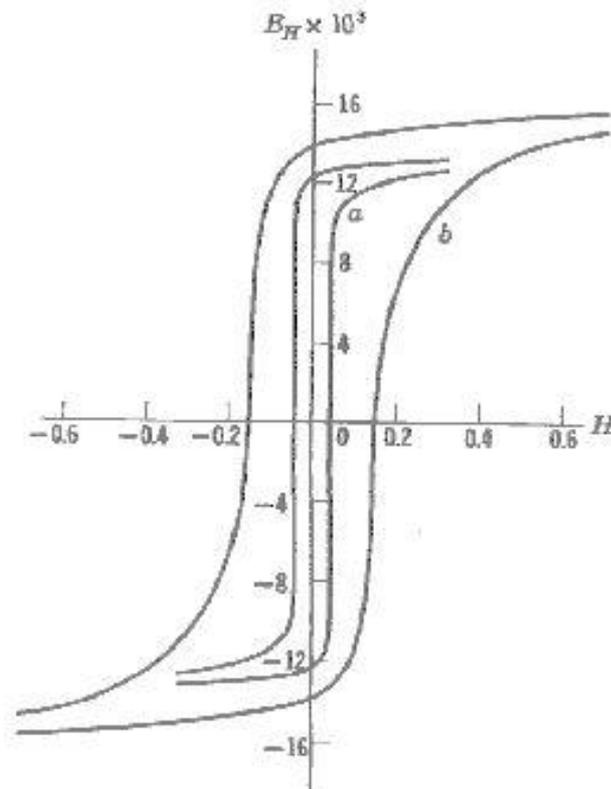
- Transformadores de núcleo envolvido e núcleo envolvente;



- Para dirimir os efeitos do aquecimento são usados elementos refrigerantes na sua operação;
- Os principais refrigerantes usados são o ar e o óleo mineral;
- O uso do óleo e de outros líquidos justifica-se dada as melhores características técnicas e elétricas do material (rigidez dielétrica, condutividade térmica, maior calor específico etc). Isto permite maior capacidade de armazenamento térmico, evitando a oxidação dos materiais.



- Sobre a constituição do material magnético empregado, A figura mostra a curva de histerese para o Fe puro (a) e para o Fe-Si (97-3%) (Hypersil) (b).



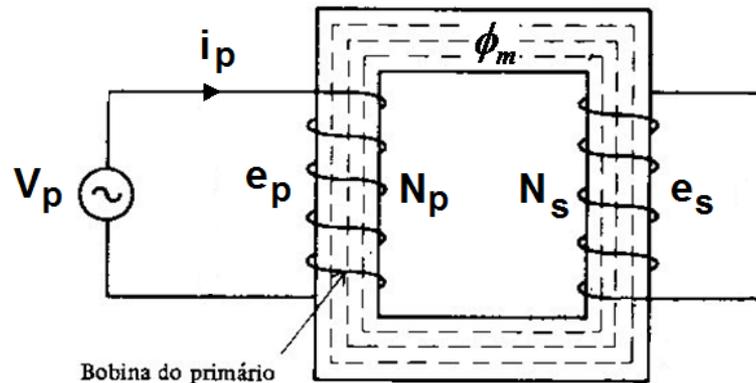
3. Princípio de funcionamento

- Um transformador essencialmente é constituído por dois ou mais enrolamentos concatenado por um campo magnético mútuo;
- Se um destes enrolamentos, o primário, for ligado a uma fonte de tensão alternada, será produzido um fluxo alternado cuja amplitude dependerá da tensão e do número de espiras do primário;
- O fluxo mútuo concatenar-se-á com o outro enrolamento e induzirá uma tensão, cujo valor dependerá do número de espiras do secundário.

4. Transformador ideal

- Um transformador ideal é aquele em que o acoplamento entre suas bobinas é perfeito, ou seja, todas concatenam, ou “abraçam”, o mesmo fluxo, o que vale dizer que não há dispersão de fluxo;
- Isso implica assumir a hipótese de que a permeabilidade magnética do núcleo ferromagnético é alta ou, no caso ideal, infinita, e o circuito magnético é fechado;
- Além disso, admite-se que o transformador não possui perdas de qualquer natureza, seja nos enrolamentos, seja no núcleo.

Características de um transformador ideal a vazio

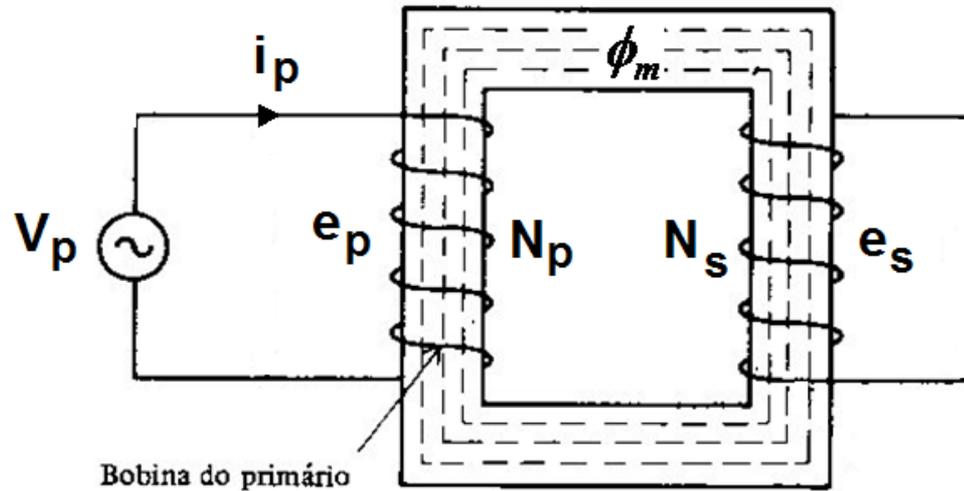


Uma fonte de tensão alternada fornece:

$$V_p(t) = V_{1_max} \cdot \text{Sen}(wt)$$

A corrente i_p circulando pelas espiras N_1 gera um fluxo Φ em fase com a corrente e defasado de 90° da tensão, desprezando a resistência do enrolamento da bobina (bobina puramente indutiva).

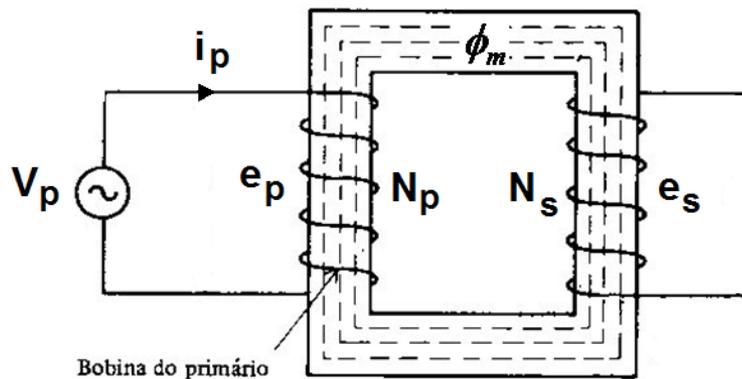
$$\phi_m = \phi_{max} \cdot \text{Sen}\left(wt - \frac{\pi}{2}\right)$$



Como o fluxo varia no tempo, induzirá uma diferença de potencial “ e_p ” dada por:

$$e_p = -N_p \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$$

O sinal é negativo, pois o fluxo induzido é contrário a fonte geradora (lei de Lenz)



$$e_p = -N_p \cdot \frac{d(\Phi_{max} \cdot \text{sen}(wt - \frac{\pi}{2}))}{dt}$$

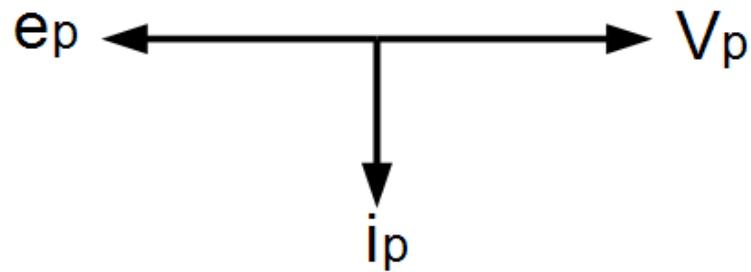
$$e_p = -N_p \cdot \Phi_{max} \cdot \omega \cdot \text{cos}(wt - \frac{\pi}{2})$$

$$e_p = -\omega \cdot N_p \cdot \Phi_{max} \cdot \text{sen}(wt)$$

$$e_p = \omega \cdot N_p \cdot \Phi_{max} \cdot \text{sen}(wt - \pi)$$

$$e_p = \omega \cdot L \cdot i \cdot \text{sen}(wt - \pi)$$

Representação fasorial das tensões e corrente.



Detalhamento

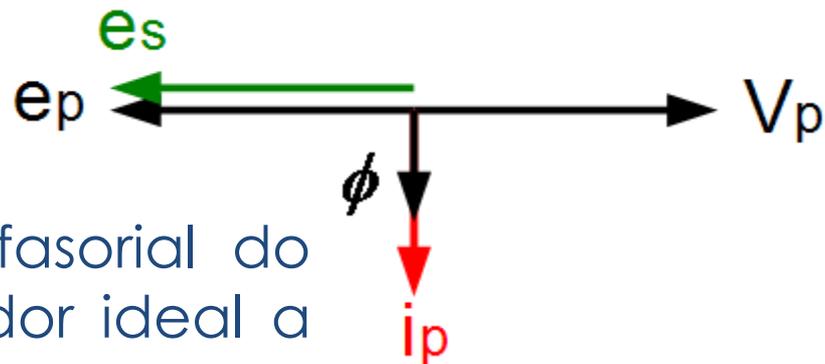


Diagrama fasorial do transformador ideal a vazio

Transformador em vazio

- Considerando o transformador ideal, sendo o fluxo total, ϕ , o mesmo em ambas as bobinas, já que se desprezam os fluxos dispersos e o núcleo tem $\mu \rightarrow \infty$, as f.e.m.'s, e_1 e e_2 , induzidas nessas bobinas (adotando a convenção receptor), escrevem-se como:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

E

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

- Para se conhecer a relação existente entre a tensão primária e secundária, basta dividir uma pela outra:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

- Sendo “a” denominada *relação de espiras* ou *relação de transformação*. Esta é a primeira propriedade do transformador que é a de *transferir* ou *refletir* as tensões de um lado para outro segundo uma constante “a”.

Exercício:

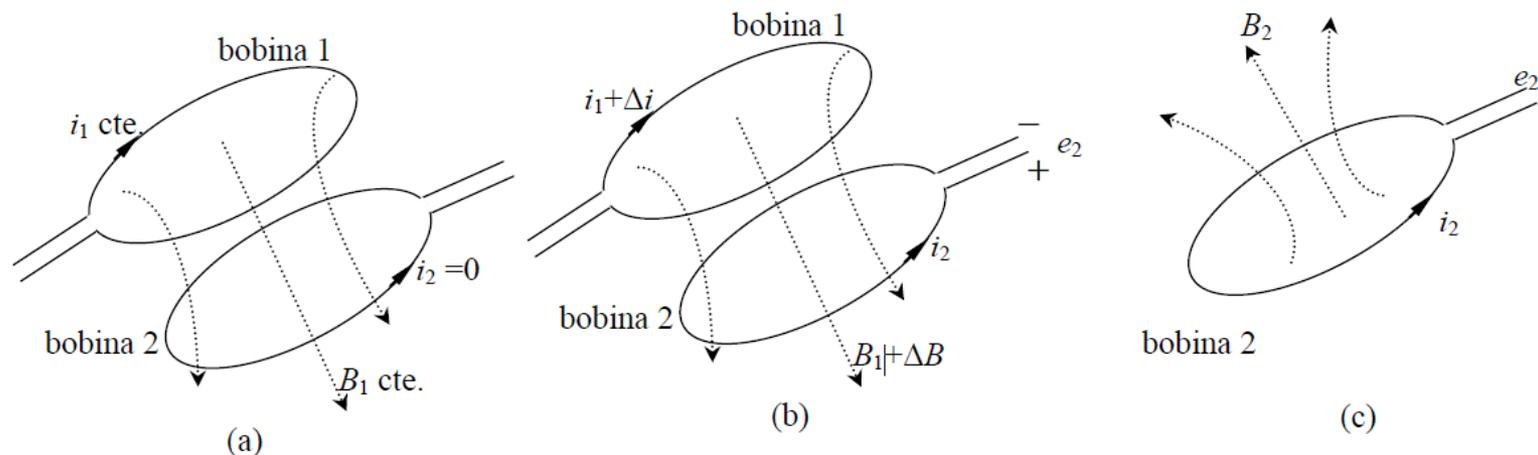
Um transformador monofásico ideal opera numa frequência de 60 [Hz], tem uma seção transversal no núcleo de 107 [cm²]. A densidade de fluxo máxima no núcleo é de $6 \cdot 10^{-2}$ [Wb/m²]. Há 700 voltas de fio no enrolamento de alta tensão. Se o transformador é abaixador, com uma relação de espiras de 10 para 1, determinar as FEM induzidas no primário e secundário.

$$E_p = 4,44 \cdot N_p \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

Funcionamento do Trafo Ideal com Carga

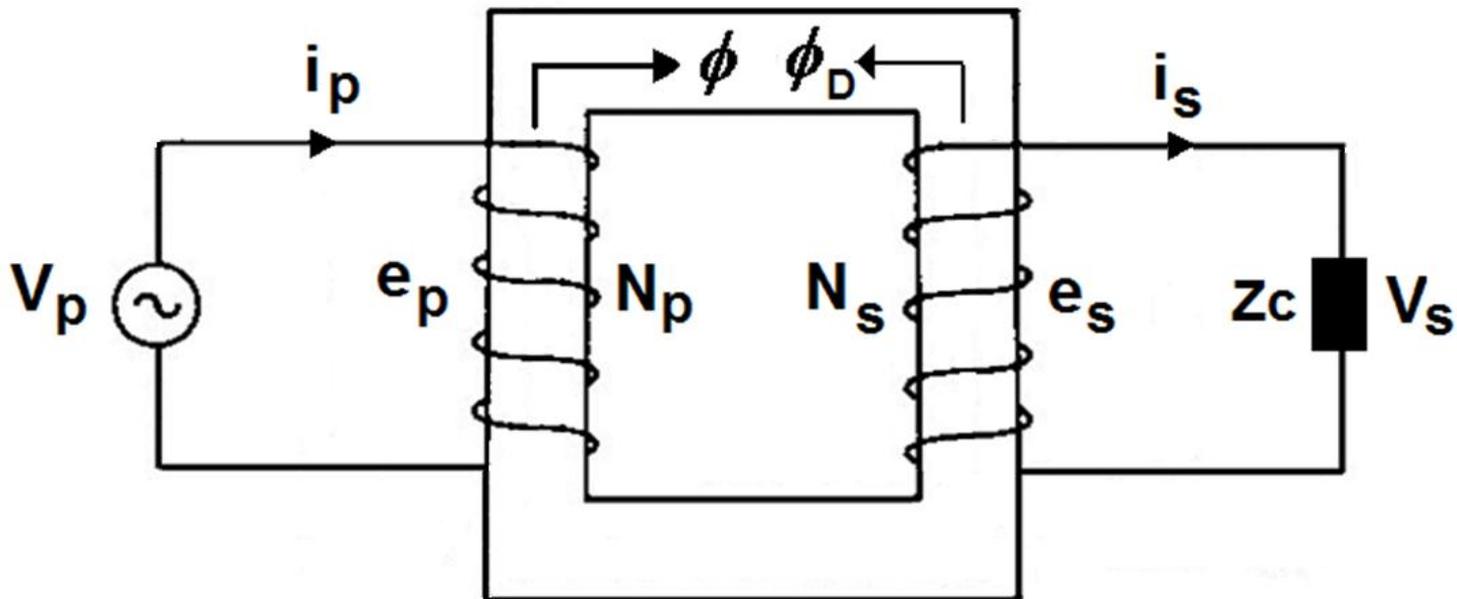
Lei de Lenz

Se o fluxo magnético que atravessa a bobina 2 *umenta*, a f.e.m. produz uma corrente cujo fluxo se *opõe ao aumento* do fluxo que atravessa esta; se o fluxo *diminui*, há aumento da corrente que produz o fluxo que atravessa a bobina 2.



Colocando carga nos terminal do secundário, fluirá uma corrente I_2 pelo secundário.

A corrente provoca um fluxo desmagnetizante Φ_D , devido a FCEM.



O fluxo resultante terá intensidade menor, provocando uma queda na FEM induzida em e_p e e_s .

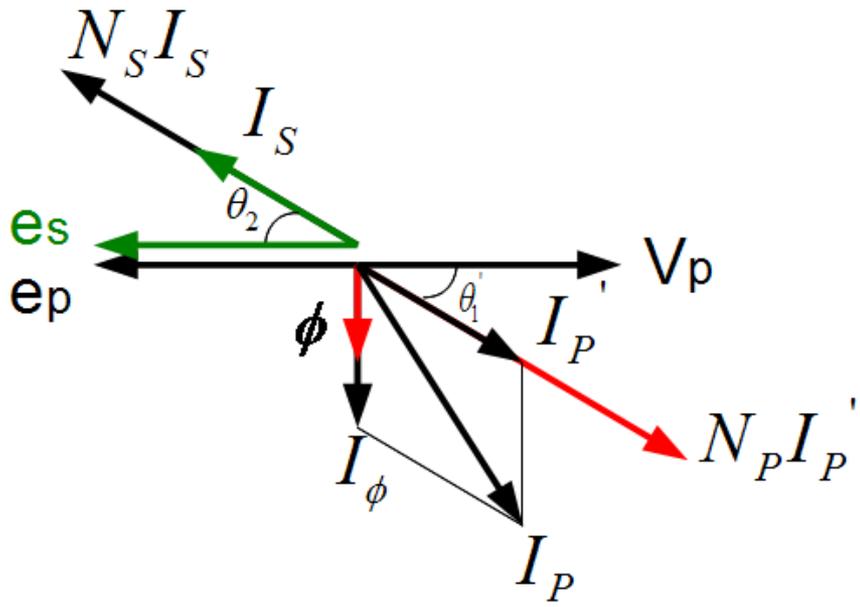
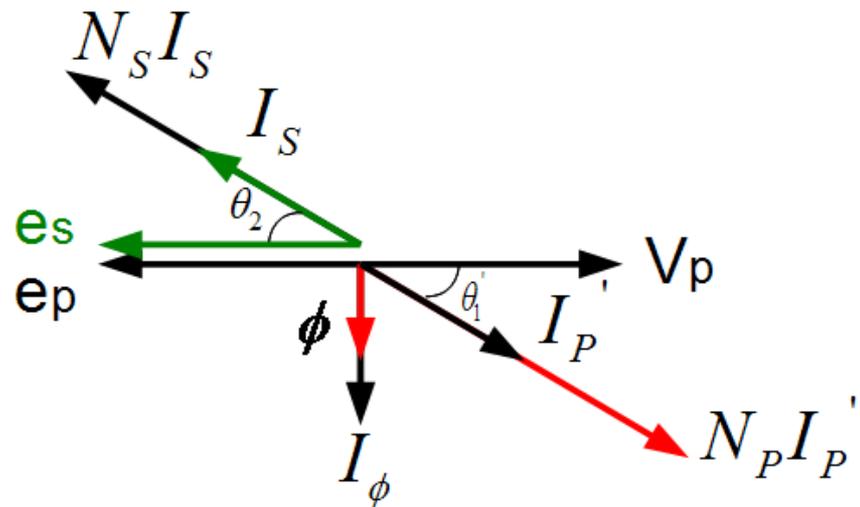
Redução da tensão e_p para a mesma tensão V_p , provoca um incremento da corrente I_p .

$$\dot{I}_P = \dot{I}_P' + \dot{I}_Q$$

\dot{I}_P = Corrente total no primário;

\dot{I}_P' = Corrente para compensar o fluxo desmagnetizante;

\dot{I}_ϕ = Corrente de magnetização do núcleo.



- Ao se acoplar uma carga a esse transformador ideal, circulará uma corrente de carga pelo enrolamento secundário, i_c , dada por:

$$i_c = \frac{e_2}{Z_c}$$

Essa corrente $i_c = i_2$ produzirá uma força magnetomotriz (f.m.m.), \mathcal{F}_c , dada por:

$$\mathcal{F}_c = N_2 i_2 = \phi_1 \mathcal{R}_{\text{núcleo}} \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_c = N_2 i_2 = \mathcal{F}_2$$

- que, pela Lei de Lenz, tende a se opor, ou desmagnetizar o núcleo. Por outro lado, o fluxo tem que se conservar, uma vez que é imposto pela tensão aplicada $v_1 = e_1$, de acordo com a Lei de Faraday. Para que o fluxo permaneça invariante, o primário reage, absorvendo uma corrente i_1 , tal que

$$\mathcal{F}_1 = N_1 i_1 = \phi_1 \mathcal{R}_{\text{núcleo}}$$

- Como, para um transformador ideal, $\phi_1 = \phi_2 = \phi$, tem-se que:

$$N_2 i_2 = N_2 i_2 = \phi_2 \mathcal{R}_{\text{núcleo}} = \phi_1 \mathcal{R}_{\text{núcleo}} = N_1 i_1$$

Ou seja

$$N_2 i_2 = N_1 i_1$$

Ou ainda

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

- Além da transformação de tensões ou correntes, os transformadores também alteram a impedância do circuito;
- A impedância do circuito primário é dada pela relação entre e_1 e i_1 , como segue:

$$Z_1 = \frac{e_1}{i_1} = a \frac{e_2}{i_2/a} = a^2 Z_2$$

Ou, considerando que $Z_2 = Z_c$ é a impedância de carga,

$$Z_1 = a^2 Z_c$$

- A impedância Z_1 é, na verdade, a impedância real “vista” pela fonte, ou seja, o primário “enxerga” qualquer carga Z_c conectada aos terminais do secundário multiplicada pelo quadrado da relação de transformação.
- Em alguns casos o casamento de impedâncias é a principal função de um transformador.
- Entretanto, independentemente de sua aplicação, a impedância “vista” pelo primário, ou a ***impedância efetiva do circuito primário, depende da relação de espiras ao quadrado e da impedância do secundário.***

Exercício 1:

O lado de alta tensão de um trafo tem 500 espiras, enquanto o de baixa tem 100 espiras, quando ligado como abaixador, a corrente de carga é de 12 A. Calcule:

- a) A relação de transformação, a ;
- b) A corrente de carga do lado primário;
- c) A relação do transformador quando ele for usado como elevador.

Exercício 2:

O lado de alta tensão de um trafo tem 800 espiras, enquanto o de baixa tem 100 espiras. Uma tensão de 240 V é aplicada ao lado de alta e uma impedância de carga de 3 ohms é ligada ao lado de baixa. Calcule:

- a) A tensão e corrente secundária;
- b) A corrente primária;
- c) A impedância de entrada do primário a partir da relação entre a tensão e corrente primária;
- d) A impedância de entrada do primário por meio da relação de transformação.

Potencia elétrica

Se calcularmos as potências elétricas de primário e secundário, teremos:

$$S_1 = v_1 i_1 \quad \rightarrow \quad S_2 = v_2 \cdot -i_2 = \frac{v_1}{a} (-i_1 \cdot a) = -S_1$$

- A expressão acima confirma as hipóteses estabelecidas para um transformador ideal, ou seja, ausência de perdas.
- Toda potência que entra pelo primário, sai pelo secundário. O sinal negativo acima indica que o sentido do fluxo de potência é distinto para primário e secundário, ou seja, a potência positiva *entra* pelo primário (convenção receptor) e a potência negativa *sai* pelo secundário (convenção gerador).

- Embora um transformador real esteja sujeito a perdas devido à resistência de condutores, correntes induzidas no núcleo e correntes necessárias para magnetizar seu núcleo (bem como perdas capacitivas), a principal hipótese considerada na definição de um transformador ideal foi a adoção de uma permeabilidade infinita do núcleo, o que implica uma relutância nula para esse circuito magnético.
- Todavia, em algumas aplicações práticas e para alguns transformadores, essa hipótese raramente ou nunca se aplica, como é o caso de transformadores com núcleo de ar.
- Em muitos transformadores as perdas são relativamente pequenas (às vezes menores que 1%) e as aproximações acima são razoáveis. No entanto, em transformadores de baixa potência, as perdas podem ser elevadas com relação à potência total do transformador.

Transformador ideal em regime permanente senoidal

Quando uma tensão senoidal de frequência angular ω , igual a

$$\omega = 2\pi f$$

sendo f a frequência em Hz,

é aplicada ao enrolamento primário de um transformador e o enrolamento secundário é mantido em circuito aberto, a tensão primária é balanceada por uma f.e.m., induzida pela taxa de variação do fluxo concatenado com o enrolamento primário, λ_1 , dado por:

$$\lambda_1 = N_1 \Phi$$

ϕ é o fluxo no núcleo do transformador, que também possuirá variação temporal senoidal, como segue,

$$\phi = \phi_{max} \text{sen}\omega t$$

Dessa maneira, a tensão primária se escreve como:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = N_1 \omega \phi_{max} \text{cos}\omega t$$

Cujos valores máximo (ou de pico) e eficaz (ou r.m.s.) valem

$$e_{1max} = N_1 \omega \phi_{max}$$

$$E_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 2\pi f \phi_{max}$$

Ou ainda,

$$E_{rms} = 4,44 N_1 f \phi_{max}$$

- Esses resultados se aplicam tanto a materiais magnéticos como não magnéticos.
- O fluxo estabelecido num núcleo depende da tensão (forma de onda, magnitude e frequência) aplicada e do número de espiras da bobina de excitação.
- Ao contrário do que ocorre no caso de estruturas excitadas com corrente contínua, nem a natureza do material, nem as dimensões do núcleo afetam o valor do fluxo.

Exercício 3:

- Um transformador ideal com $N_1=500$ espiras e $N_2=250$ espiras alimenta uma carga resistiva de resistência 10 ohms. O primário é alimentado por uma fonte de tensão senoidal dada por:

$$v_1 = \sqrt{2}200\cos 377t \text{ V. Determine:}$$

- a tensão no secundário;
- a corrente na carga;
- a corrente no primário;
- a potência aparente fornecida ao primário;
- a potência aparente consumida pela carga.

Solução:

a) Lembrando que $\frac{\hat{V}_1}{\hat{V}_2} = a$ e sendo $\hat{V}_1 = 200|0^\circ$ V resulta:

$$\frac{200|0^\circ}{\hat{V}_2} = 2 \text{ ou } \hat{V}_2 = 100 \text{ V}$$

b) A corrente na carga é obtida a partir da aplicação da Lei de Ohm, isto é:

$$\hat{I}_L = \frac{\hat{V}_2}{R} \text{ ou } \hat{I}_L = \frac{100|0^\circ}{10} = 10|0^\circ \text{ A}$$

c) A corrente no primário é obtida a partir da relação:

$$\frac{\hat{I}_1}{\hat{I}_L} = \frac{1}{a} \text{ ou } \hat{I}_1 = \frac{10|0^\circ}{2} = 5|0^\circ \text{ A}$$

d) A potência aparente fornecida ao primário é dada por:

$$\hat{S}_1 = \hat{V}_1 \cdot \hat{I}_1^* = 200|0^\circ \cdot 5|0^\circ \text{ VA} = 1000|0^\circ \text{ VA}$$

e) A potência aparente fornecida à carga é dada por:

$$\hat{S}_L = \hat{V}_2 \cdot \hat{I}_L^* = 100|0^\circ \cdot 10|0^\circ = 1000|0^\circ \text{ VA}$$

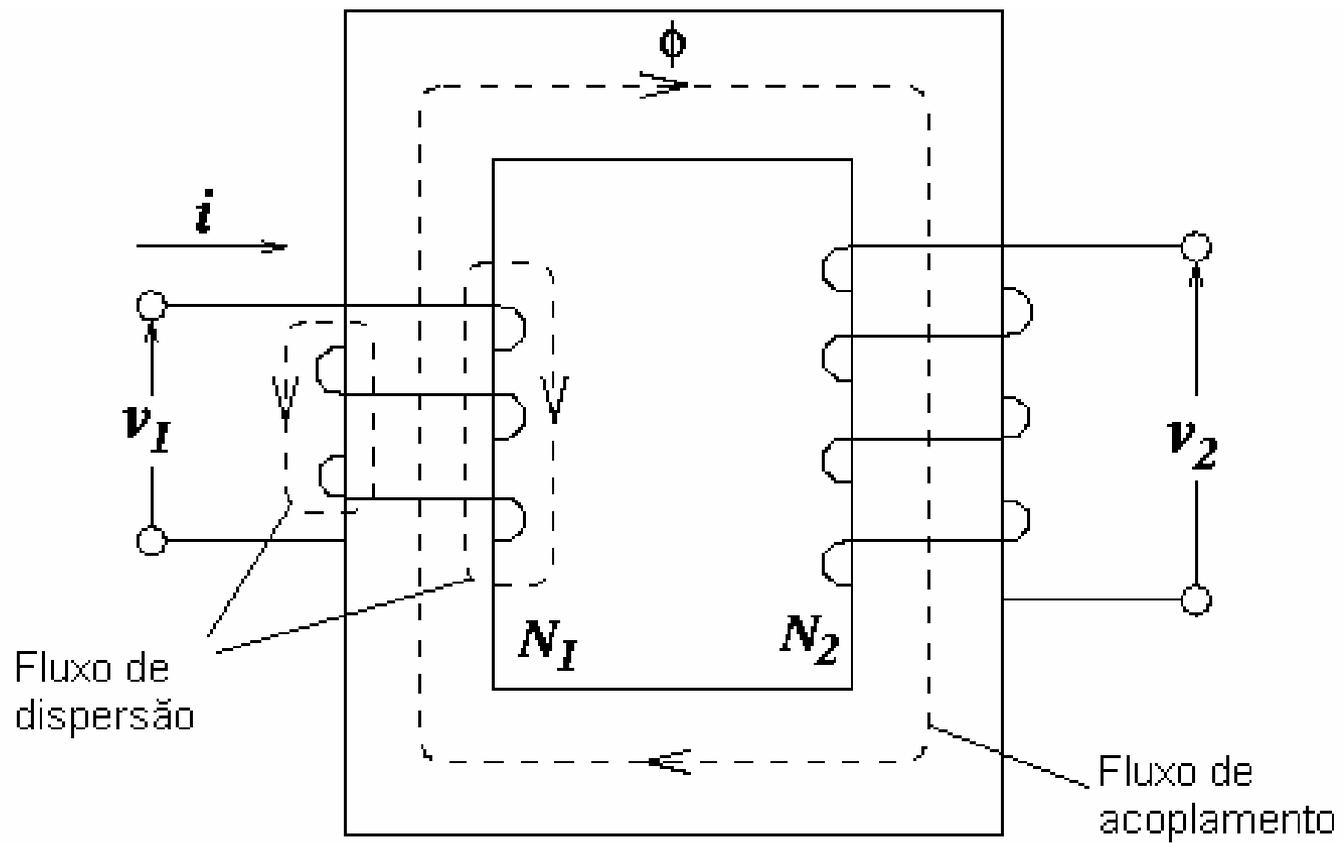
OBS.: A potência aparente fornecida ao primário e a consumida pela carga são iguais pelo fato do transformador ser ideal.

5. Transformador real

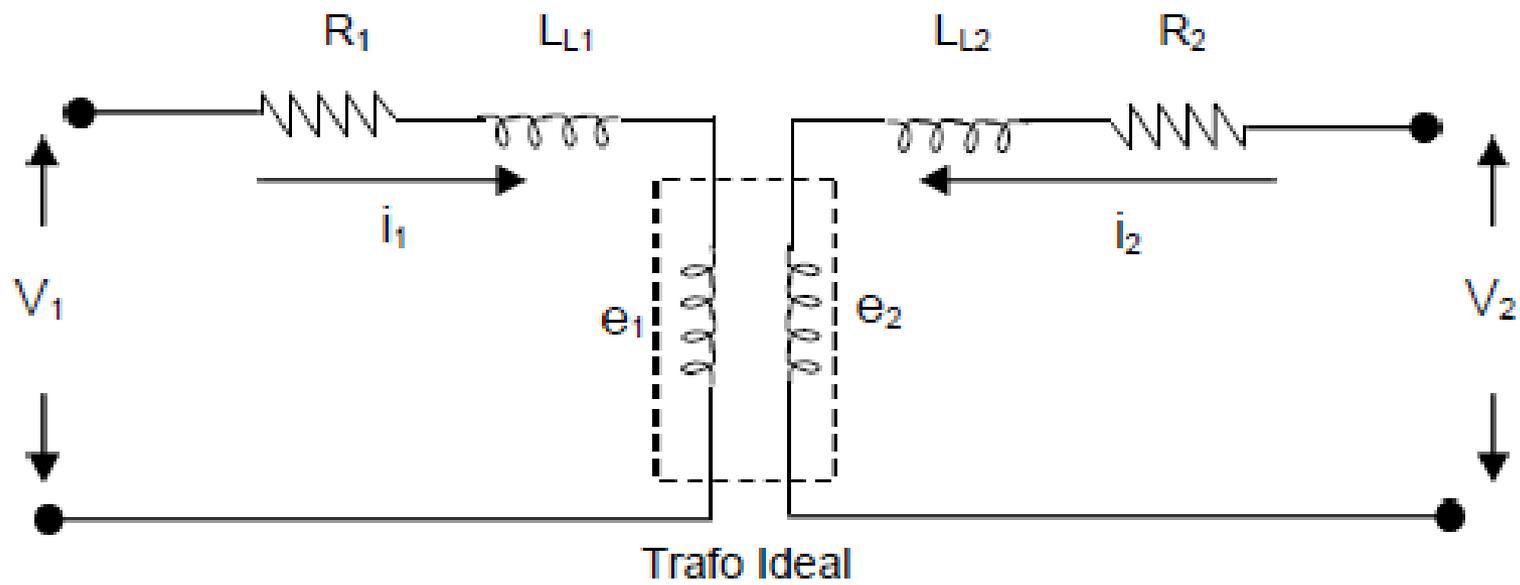
- Evoluindo nos conceitos e nas características de um transformador, vamos aumentar a proximidade do nosso estudo, trazendo algumas características mais reais, porém não tão perfeitas;
- O transformador ora em estudo terá as seguintes características:

- A curva de magnetização B-H do núcleo não será linear;
- Sua permeabilidade agora não será mais infinita, o que significa estar trabalhando com alguma relutância do material ($R \neq 0$);
- O fluxo magnético não estará mais confinado apenas no núcleo. Isto significa que haverá linhas de campo percorrendo o meio externo (ar). Ou seja, estaremos considerando o efeito da **dispersão das linhas**;
- As bobinas terão resistência ôhmica;
- O enlaçamento das linhas de campo percorrerá outros caminhos.

- Chamamos de **dispersão das linhas** as linhas de campo que não estão confinadas ao material magnético em toda sua trajetória;
- Explica-se: de todo fluxo magnético produzido pela corrente na bobina, parte deste fluxo não chegará a outra bobina. Este fluxo ficará disperso entre o núcleo e o ar, circulando na própria bobina que a gerou;
- Isto faz com que haja um desperdício de energia, pois este fluxo disperso não produz trabalho, pelo contrário, provoca queda de tensão na bobina



- O fluxo de dispersão poderia ser pensado como se uma "bobina" (reatância indutiva) externa estivesse junto à bobina do primário gerando este fluxo. Seria então uma bobina para gerar fluxo de dispersão;
- Além disso, os enrolamentos são de fios de cobre e estes possuem uma determinada resistência;
- Como dito anteriormente, estas reatâncias provocam queda de tensão no interior do trafo, como resultados de I_1 e I_2



- Considerando que, com a corrente alternada, o núcleo passa a responder pelos efeitos de histerese e de corrente parasita, o trafo agora apresenta perdas magnéticas;
- Estas perdas respondem pelo aquecimento que encontramos em transformadores reais;
- Assim, da figura anterior considerarmos:

$$v_1 = e_1 + e_{R1} + e_{L1} \quad e \quad v_2 = e_2 + e_{R2} + e_{L2}$$

Logo

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

A figura anterior mostra também que:

- a tensão aplicada ao primário V_1 , é maior que a fem induzida no enrolamento primário, e_1 ;
- A fem induzida no enrolamento secundário e_2 , é maior que a tensão nos terminais V_2 .

OU seja

$$e_1 = V_1 - (e_{R1} + e_{L1}) \quad \text{e} \quad e_2 = V_2 + (e_{R2} + e_{L2})$$

$$V_1 > e_1 \quad \text{e} \quad V_2 < e_2$$

Exercício 4

Um transformador **MONOFÁSICO** abaixador de 500 kVA, 60 Hz, 2.300/230 V, tem os seguintes parâmetros: $r_1=0,1\ \Omega$, $X_{L1}=0,3\ \Omega$, $r_2=0,001\ \Omega$ e $X_{L2}=0,003\ \Omega$. Quando o transformador é usado como abaixador e está com carga nominal, calcule:

- As correntes primária e secundária;
- As impedância internas de tensão primária e secundária;
- As quedas internas de tensão primária e secundária;
- As fem induzidas primária e secundária, imaginando-se que as tensões nos terminais e induzidas estão em fase;
- A relação entre as fem induzidas primária e secundária, e entre as respectivas tensões terminais.

Corrente de Magnetização (I_m) e de Perdas no Ferro (I_c)

- Quando aplicamos uma tensão senoidal nos terminais da bobina do primário, uma corrente passa a fluir por essa bobina, mesmo que os terminais do secundário estejam abertos (em vazio);
- Esta corrente é a corrente que vai gerar o fluxo magnético no núcleo de ferro, como já sabíamos. O que não sabíamos, é que esta corrente, na verdade, é constituída por dois componentes:

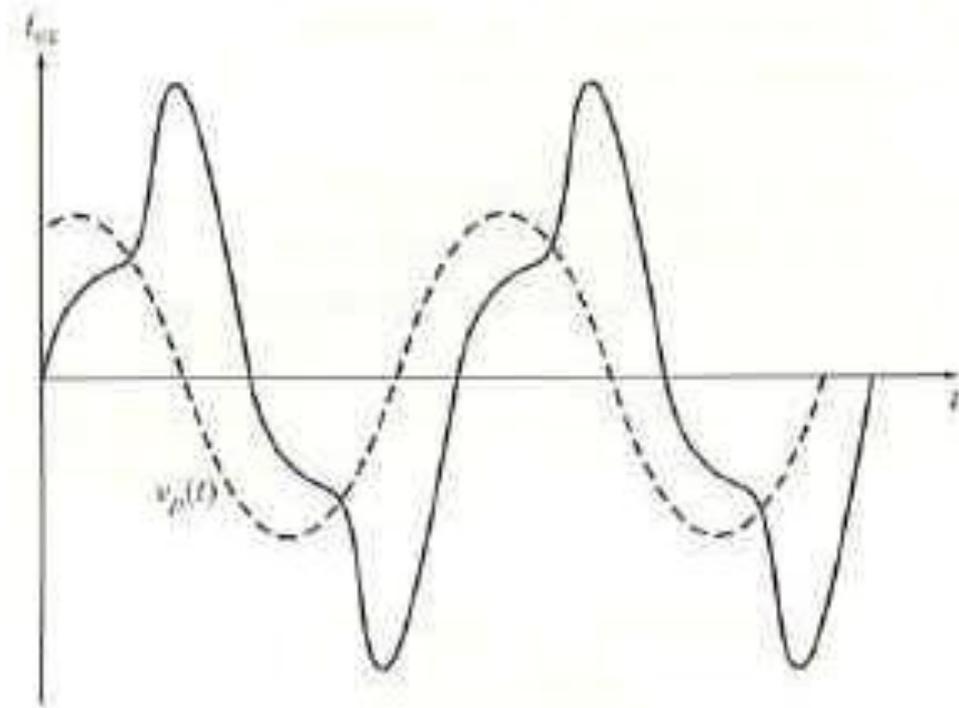
- 1) A **corrente de magnetização** (i_m), requerida para produzir fluxo magnético no núcleo do sistema;
- 2) A **corrente de perdas no ferro** (i_c), requerida para caracterizar as perdas por histerese e correntes parasitas (eddy current) no núcleo.

- A **corrente de magnetização** é a corrente que efetivamente vai produzir acoplamento magnético entre os sistemas elétricos adjacentes. É o que provoca trabalho;
- A **corrente de perdas do ferro**, como já está dizendo, é a corrente que apenas produzirá perdas no núcleo, sem produção de trabalho efetivo.

- Desta forma, podemos dizer que, num transformador onde o secundário não está conectado a nenhuma carga (trafo em vazio – secundário aberto) a corrente que circulará na bobina do primário (i_1) é chamada de **corrente de excitação** (i_{ex}) e vale:

$$i_1 = i_{ex} = i_m + i_c$$

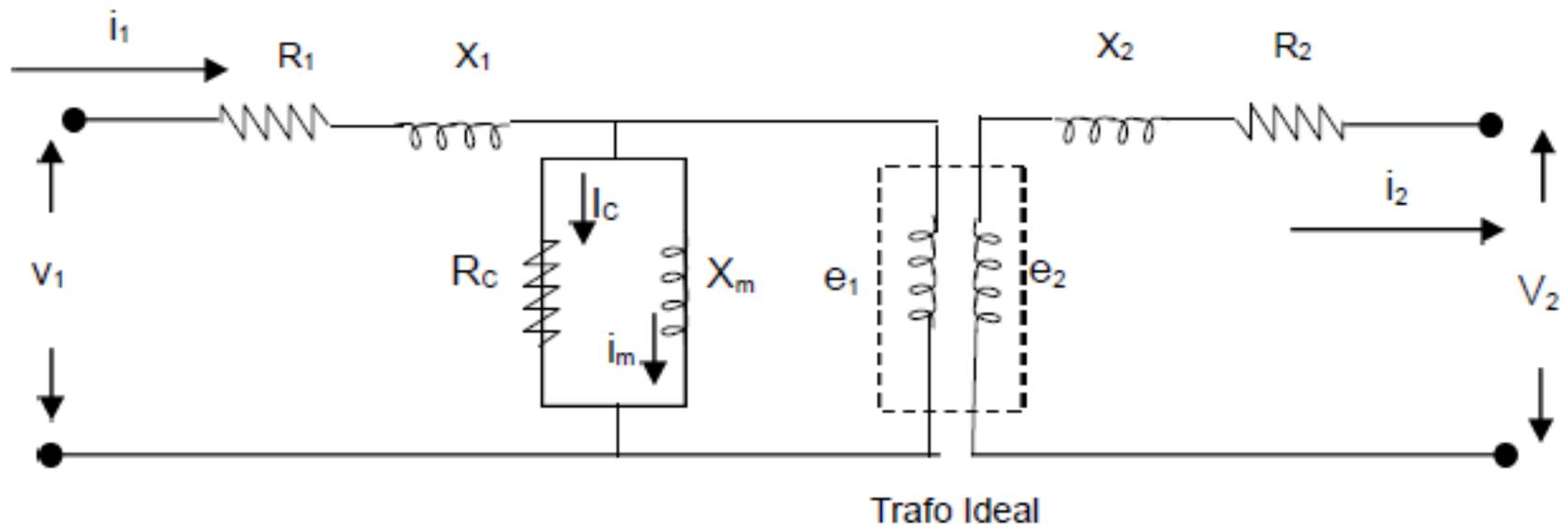
- Forma de onda da corrente de excitação total em um trafo típico sem carga no secundário. Repare na defasagem de quase 90° em relação a forma de onda da tensão aplicada.



6. Circuito elétrico equivalente

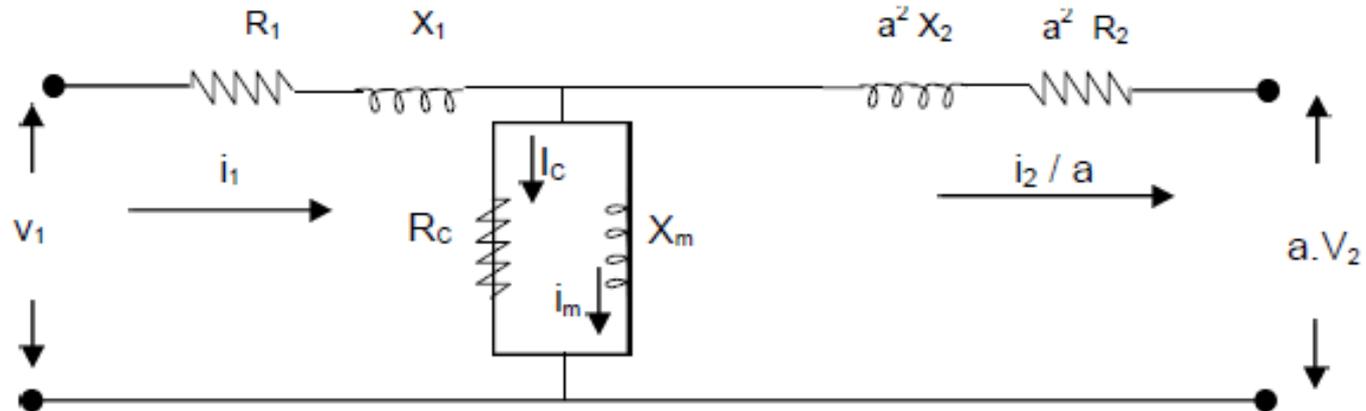
- Conforme vimos anteriormente, podemos colocar em nosso circuito equivalente "quase real" todas as correntes que representam as perdas ocorridas no núcleo do trafo real e a corrente responsável efetivamente pela geração do fluxo de acoplamento no núcleo;
- As perdas no núcleo (por histerese e por corrente parasita) acontecem numa resistência elétrica (R_C) que representa a condição de condução de corrente pelo núcleo de ferro.

- A corrente de magnetização (i_m) gera fluxo para realizar o acoplamento magnético. Neste caso, para representar este fenômeno, uma reatância de magnetização (X_m) é introduzida no circuito. Tanto R_C quanto X_m estão sob a mesma tensão induzida e_1 no primário, ou seja, eles estão em paralelo.
- Diante desta definição, podemos desenhar o circuito equivalente da seguinte forma:

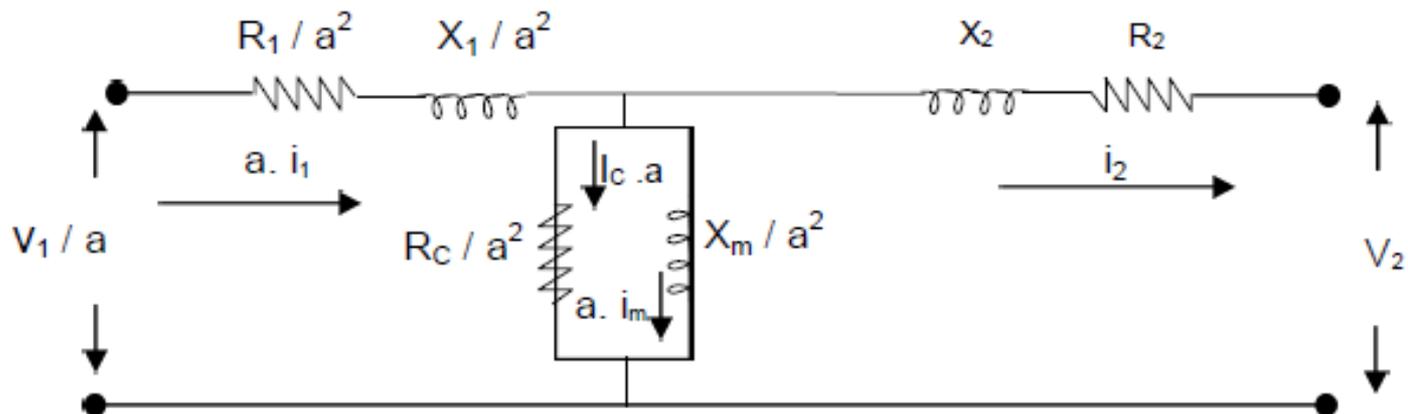


- O Trafo ideal representa a passagem da transformação de tensão ou corrente, pela razão de espiras N_1/N_2 . Para eliminarmos o Trafo ideal, devemos trazer impedâncias, tensões e correntes do secundário para o lado do primário;
- Lembrando que $Z_1 = a^2 \cdot Z_2$, a impedância, a tensão e a corrente no lado do secundário podem ser transferidas para o lado do primário por “a” e chamamos isto de ***circuito visto pelo lado do primário***;
- O circuito equivalente pode ser referido também pelo lado do secundário. Para isto, basta transferir todas as variáveis do primário para o secundário, usando a mesma relação. Neste caso denominamos ***circuito visto pelo secundário***.

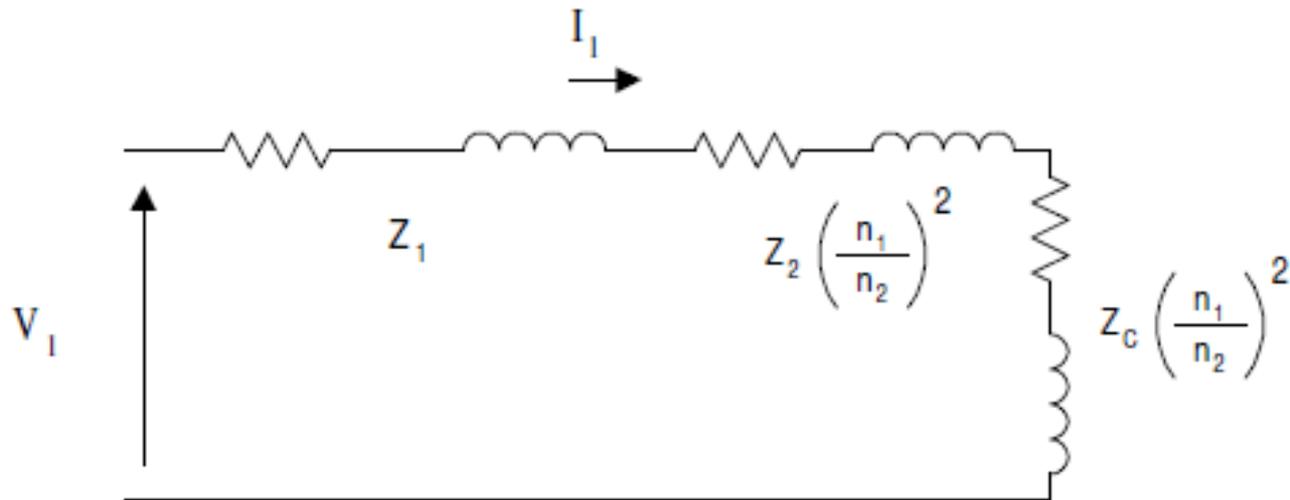
- Circuito visto pelo primário



- Circuito visto pelo secundário



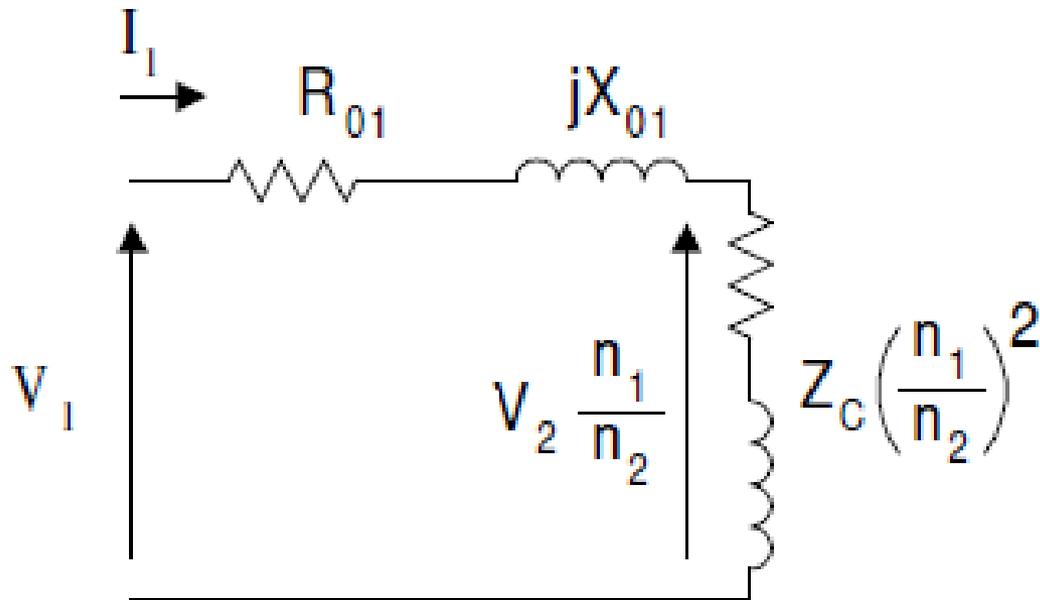
- Circuito visto pelo primário desprezando-se a corrente de excitação



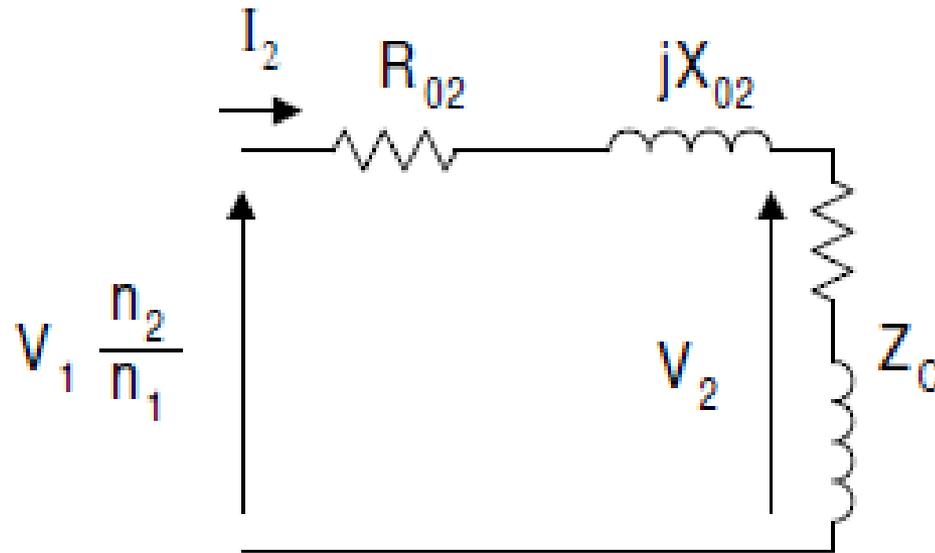
- Fazendo-se

$$Z_{01} = Z_1 + Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

- Circuito Simplificado referido ao primário



- Da mesma forma, com o devido tratamento matemático pode-se ter o seguinte circuito simplificado referido ao secundário:



Exercício 5

Um transformador de distribuição, com valor de placa de 100 kVA, 1.100/220 V, 60 Hz, tem a resistência de enrolamento de alta tensão de 0,1 ohm e uma reatância de dispersão de 0,3 Ω . A resistência do enrolamento de baixa tensão é 0,004 Ω e a reatância de dispersão é de 0,012 Ω , o transformador é abaixador. Considerando a carga nominal puramente resistiva e as correntes de excitação desprezíveis:

- a) Calcule a resistência e a reatância equivalentes referidas à alta e à baixa tensão;
- b) Calcule a queda de tensão em ambas expressas em % da tensão primária e secundária;
- c) Calcule a impedância interna referida a ambos os lados;

Exercício 6

Um transformador monofásico de 150 kVA, V_2 igual a 240 V, razão de espiras igual a 10 e a carga com fator de potência igual a 0,80 atrasado tem os seguintes parâmetros medidos: $R_1 = 0,2 \text{ W}$, $R_2 = 2,0 \text{ m}\Omega$, $X_{L1} = 0,45 \text{ }\Omega$, $X_{L2} = 4,5 \text{ m}\Omega$, $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ e $X_m = 1,55 \text{ k}\Omega$. Usando um circuito equivalente visto pelo primário, determine:

- A corrente I_2 visto pelo primário e secundário;
- A tensão induzida e_1 ;
- As correntes I_C , I_m e I_{EXC} ;
- A corrente I_1 ;
- A tensão aplicada V_1 ;

6. Determinação dos parâmetros de um trafo

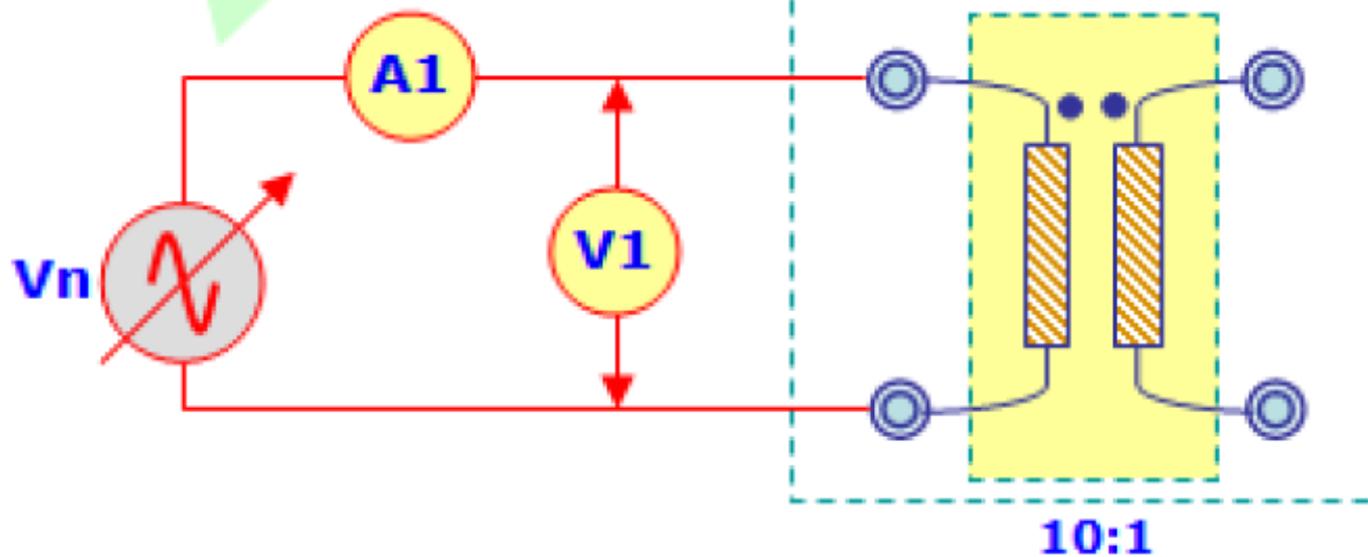
- Os parâmetros elétricos de um transformador podem ser determinados por dois tipos de ensaios elétricos:
 - Ensaio em circuito aberto, onde são determinadas as perdas do núcleo e conseqüentemente a impedância de magnetização;
 - Ensaio de curto circuito: onde se pode determinar as perdas nos enrolamentos e, desta forma a impedância equivalente dos enrolamentos primários e secundários..

Ensaio em circuito aberto

- O ensaio a vazio em transformadores tem como finalidade a determinação de:
 - Perdas no núcleo ou perdas por histerese e Foucault (P_0);
 - Corrente à vazio (I_0);
 - Relação de transformação (a);
 - Parâmetro; do ramo magnetizante (R_c , X_m e Z_m).
- Como a perda no cobre do primário, provocada pela corrente de excitação, é desprezível, a potência de entrada aproxima-se das perdas no núcleo e a impedancia de excitação é igual aproximadamente à impedancia de circuito aberto.

Aplicar a tensão nominal e medir a corrente no primário

www.clubedaeletronica.com.br



- Das perdas a vazio e da corrente a vazio, pode-se obter o valor do fator de potencia a vazio;

$$P_0 = VI_0 \cos \varphi_0$$

Como,

$$I_0 \cos \varphi_0 = I_p$$

Tem-se:

$$I_q = I_0 \sin \varphi_0$$

- Além disso,

$$Z_{ca} = \frac{V_1}{I_{ca}}$$

- Com os valores das correntes do ramo magnetizante, podemos calcular os valores de resistência e reatância:

$$R_c = \frac{V_1}{I_p} = \frac{V^2}{P_0}$$

e

$$X_m = \frac{V_1}{I_q} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{Z_{ca}}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_c}\right)^2}}$$

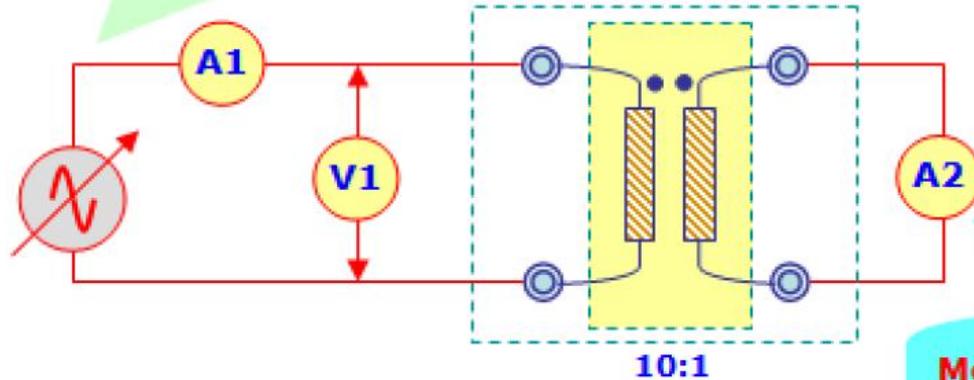
Ensaio em curto circuito

- A tensão induzida no secundário pelo fluxo resultante no núcleo iguala a queda de tensão na impedância de dispersão do secundário e na corrente nominal;
- Como esta tensão é apenas uma parcela reduzida da tensão nominal, o valor de fluxo magnético no núcleo é reduzido e a impedância de excitação, pode então ser omitida;
- Nestas condições as correntes de primário e secundário são quase iguais quando referidas ao mesmo lado. A potência de entrada pode ser assumida igual a perda total no cobre nos enrolamentos da alta tensão e baixa tensão.

- Do ensaio de curto circuito podemos obter os seguintes parâmetros:
 - Perdas no cobre (P_j);
 - Queda de tensão interna (ΔV);
 - Impedância, resistência e reatância percentuais;
 - Resistência equivalente dos enrolamentos e reatância equivalente de dispersão (Ω);

Zerar a tensão de entrada (antes de ligar) e elevá-la até que a corrente do secundário seja a nominal.

www.clubedaeletronica.com.br



Monitorar a corrente de saída, pois uma pequena tensão na entrada gera uma grande corrente na saída.

Com os valores obtidos da leitura do amperímetro, voltímetro e wattímetro, podemos escrever:

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

Dai podemos escrever também:

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad \text{e} \quad X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

- É praticamente impossível desassociar os valores de resistência do primário e secundário, bem como as reatâncias de dispersão referentes a cada enrolamento;
- Entretanto, se assumirmos que o transformador foi projetado de forma ótima, ou seja as perdas de ambos os lados são iguais:

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

Assim:

$$R_1 = a^2 R_2 \quad e \quad X_1 = a^2 X_2$$

Exercício 7

Um transformador monofásico de 50 kVA, 2400/120 V foi ensaiado da seguinte maneira:

- Circuito aberto, medição do lado de BT:
 - $P = 396 \text{ W}$
 - $I_{CA} = 9,65 \text{ A}$
 - $V_N = 120 \text{ V}$
- Curto-circuito, medição do lado de AT:
 - $P = 810 \text{ W}$
 - $I_{CC} = 20,8 \text{ A}$
 - $V_{CC} = 92 \text{ V}$

Determinar os parâmetros do circuito referidos do lado de AT e BT.

7. Rendimento e regulação de tensão

- A forma de se descrever o desempenho de um transformador depende da aplicação para a qual foi projetado.
- Para o caso de sistemas de telecomunicação o importante é a resposta em frequência do equipamento;
- Todavia para transformadores de potencia a mensuração da regulação e do rendimento é de suma importância.

Regulação de tensão

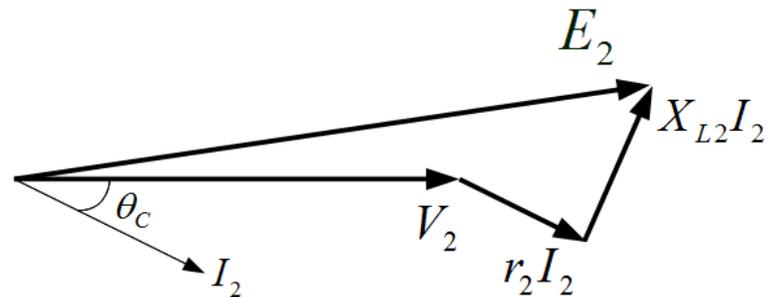
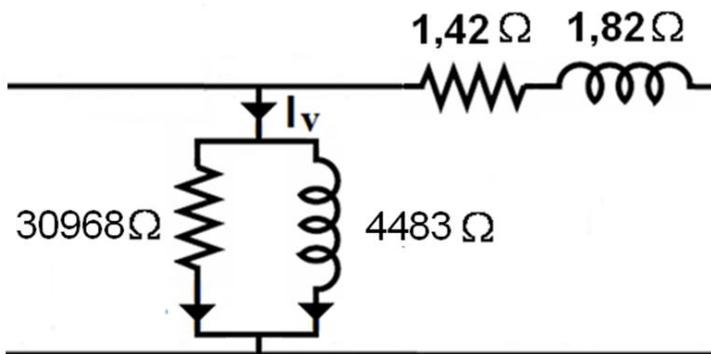
- A forma de se evitar quedas de tensão, com uma carga crescente nos circuitos de distribuição, é empregar um transformador de distribuição projetado com pequena reatância de dispersão. A figura de mérito para esta análise é a regulação de tensão;
- A regulação percentual a plena carga de um transformador de potência é a tensão secundária com carga nominal, expressa em por cento da tensão secundária nominal.

$$Reg(\%) = \frac{E_2 - V_2}{E_2} (100\%)$$

- Toda concessionária de energia deverá fornecer uma tensão primária V_1 constante. A tensão secundária do transformador variará com as modificações da carga I_2 e $\cos\theta_2$, desde um valor E_2 até um valor V_2 com carga nominal.

Exercício 8

Com os instrumentos colocados no lado de alta tensão e o lado de baixa tensão em curto, as leituras do ensaio de curto-circuito para o transformador de 50kVA, 2.400:240 [V] são 48 [V], 20,8 [A] e 617 [W]. De um ensaio de circuito aberto, em que foi alimentado o lado de baixa tensão, resultam leituras nos instrumentos neste lado de 240 [V], 5,41 [A] e 186 [W]. Determine a regulação de tensão com a carga em condições nominal, com fator de potência 0,80 indutivo.



Rendimento de transformadores

- Como no caso de outros dispositivos, o rendimento de um transformador é definido como a razão da potência útil de saída pela potência de entrada. Portanto:

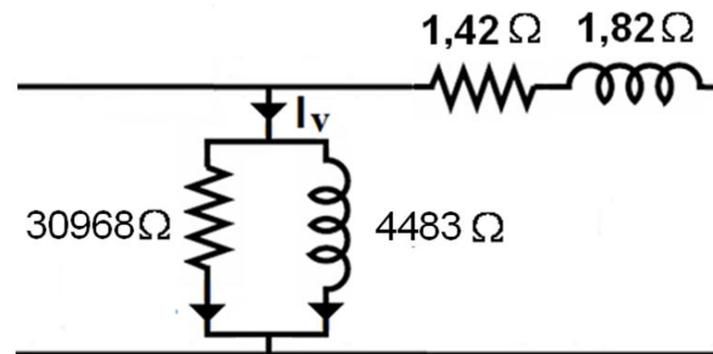
$$\eta = \frac{\text{watts de saída}}{\text{watts de entrada}} \quad \text{ou} \quad \eta(\%) = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} (100\%)$$

- Geralmente, o rendimento é determinado através de medição das perdas, conforme obtidas dos testes em vazio. Portanto:

$$\text{watts de saída} = \text{watts de entrada} - \sum \text{perdas}$$

Exercício 9

Com os instrumentos colocados no lado de alta tensão e o lado de baixa tensão em curto, as leituras do ensaio de curto-circuito para o transformador de 50 kVA, 2.400:240 V são 48 V, 20,8 A e 617 W. De um ensaio de circuito aberto, em que foi alimentado o lado de baixa tensão, resultam leituras nos instrumentos neste lado de 240 V, 5,41 A e 186 W. Determine o rendimento com a carga em condições nominal, com fator de potência 0,80 indutivo.



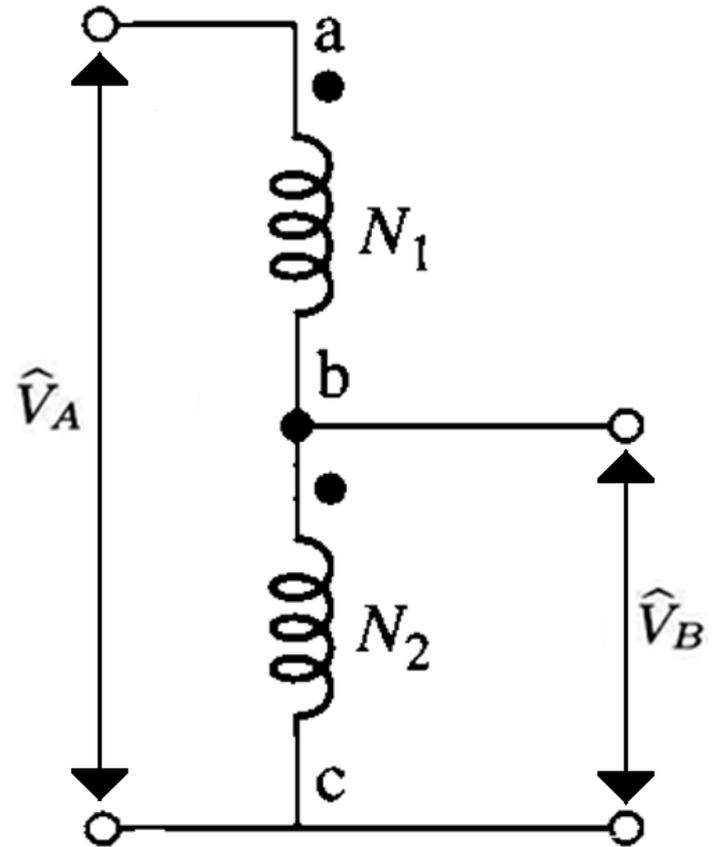
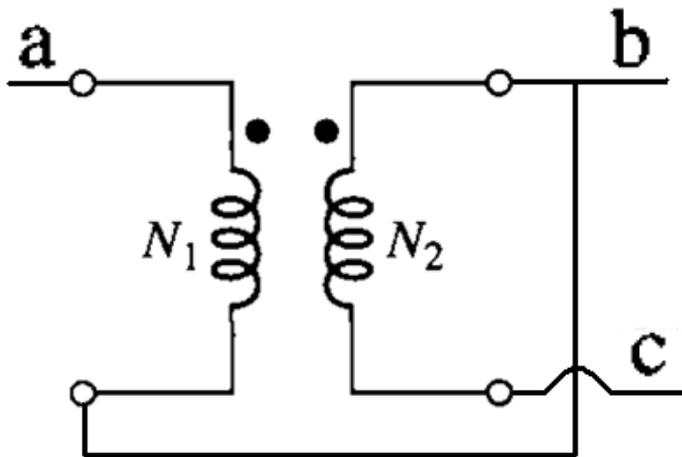
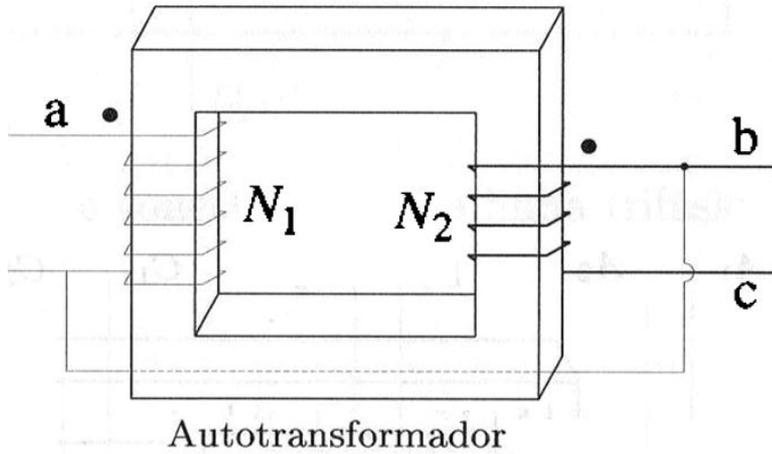
Circuito equivalente referido
ao lado de alta tensão

7. Autotransformadores

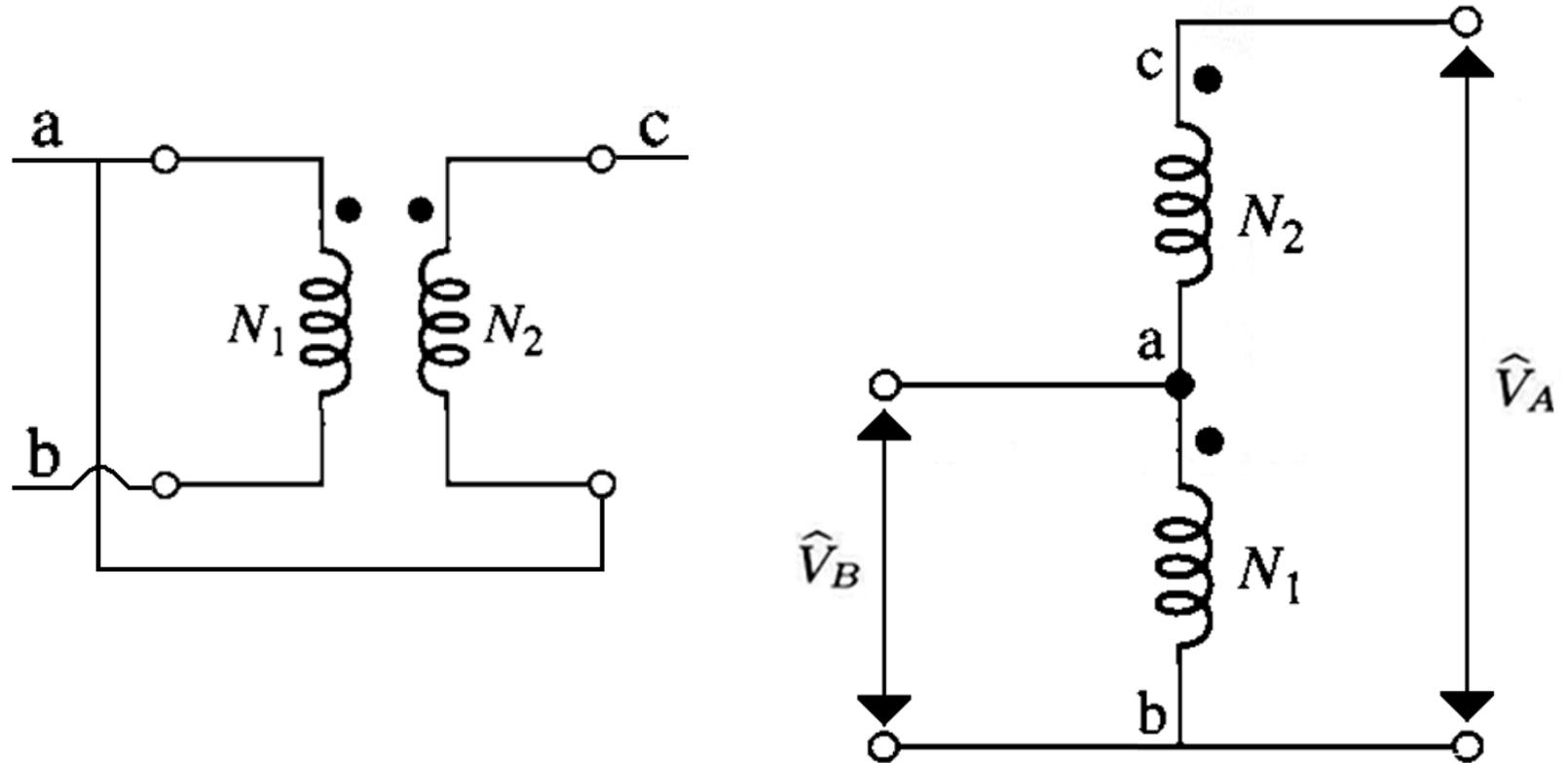
- Autotransformador pode ser considerado como um transformador de enrolamento único;
- Um transformador de enrolamentos múltiplos pode ser considerado autotrafo se conectarmos todos seus enrolamento em série, para formar um único enrolamento ;
- Comparado a um transformador de mesma capacidade kVA, o autotrafo possui dimensões menores.

- A desvantagem dessa conexão é a perda de isolamento elétrico entre os enrolamentos;
- A vantagens:
 - Tamanho menor do núcleo do autotransformador quando comparado com o tradicional transformador de dois enrolamentos;
 - Aumento da eficiência e melhor regulação de tensão.

Autotransformador abaixador

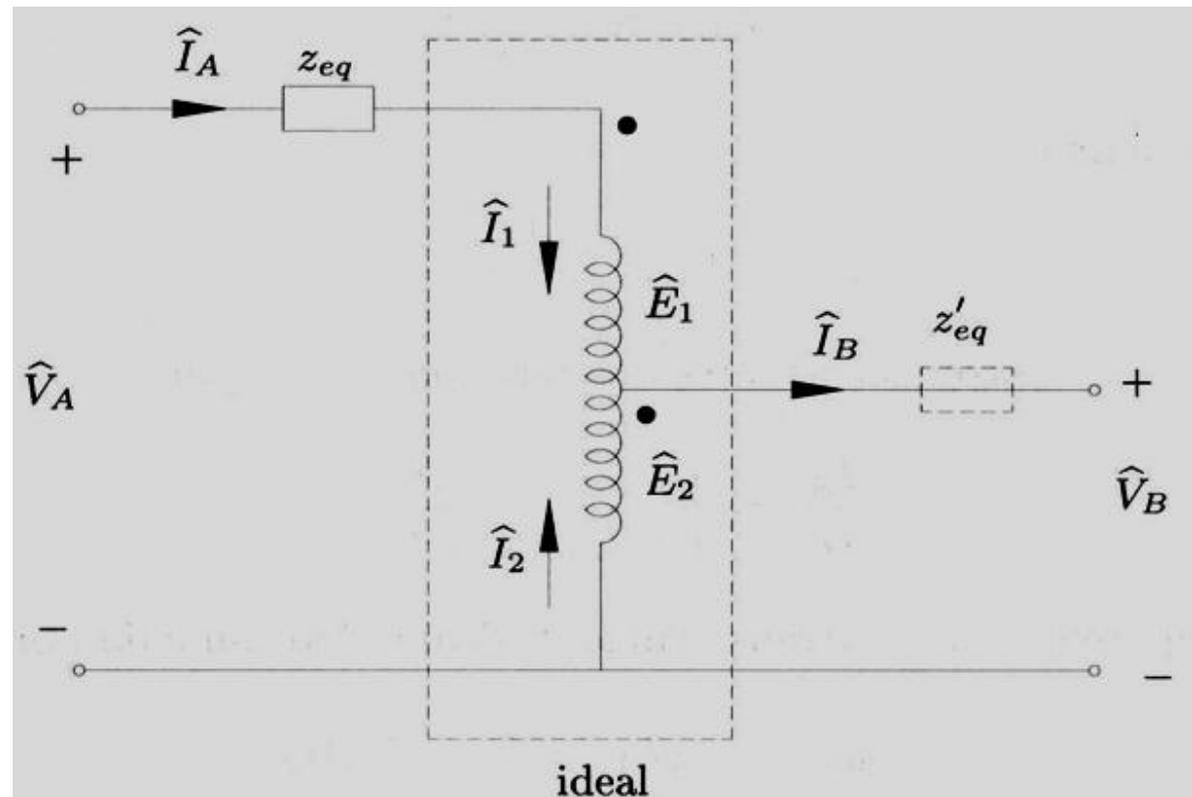


Autotransformador Elevador



Para o caso do autotrafo abaixador, conforme figura abaixo, a relação entre as tensões dos terminais do autotransformador ideal é:

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{E_1 + E_2}{E_2}$$



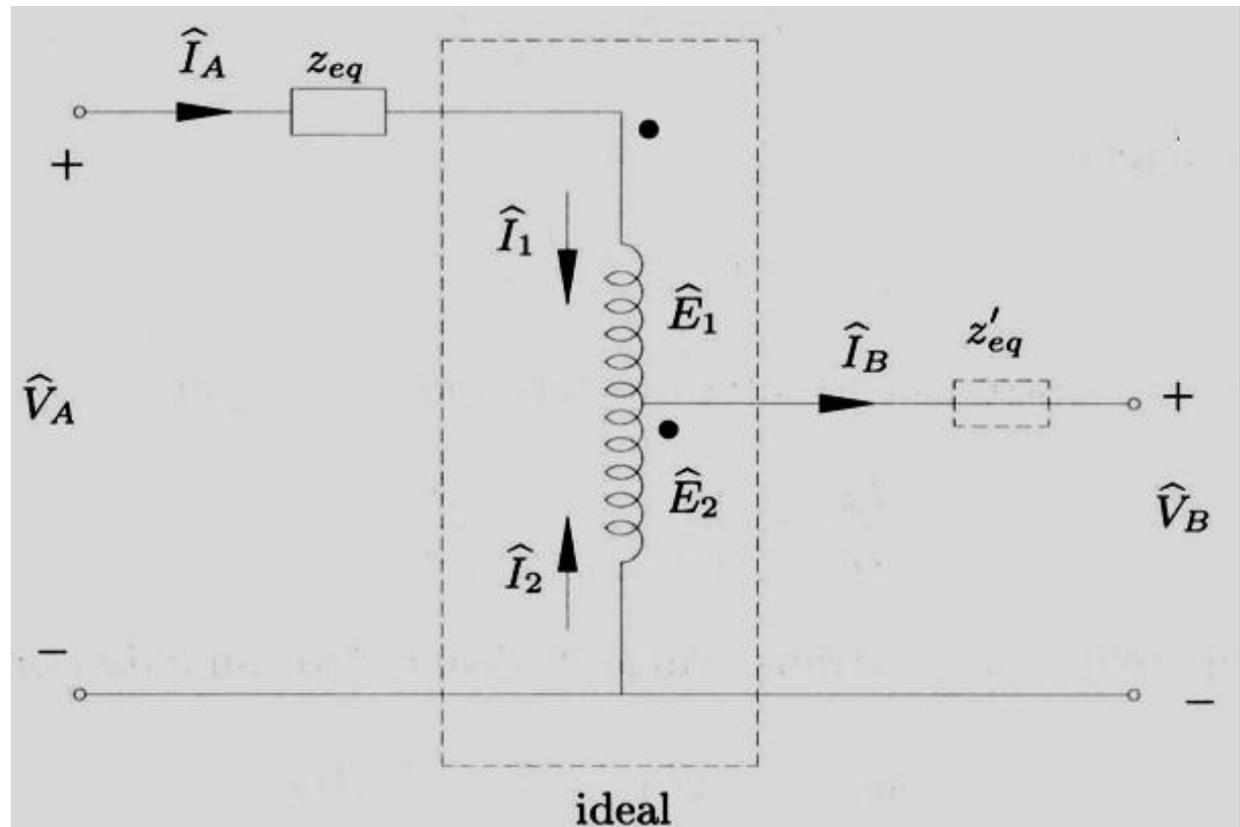
As relações entre tensão e corrente nos dois enrolamentos são válidas para o autotransformador.

Manipulando a equação obtemos então:

$$\frac{V_A}{V_B} = 1 + \frac{E_1}{E_2} = 1 + \frac{N_1}{N_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$

Considerando o autotransformador abaixador ideal, a corrente de excitação é nula, ficando a corrente no lado da alta tensão da seguinte forma.

$$I_A = I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$



A corrente no lado de baixa tensão é a soma das correntes nos enrolamentos.

$$I_B = I_1 + I_2$$

A relação entre as correntes fica da seguinte forma

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{I_1}{I_1 + I_2} = \frac{N_2}{N_1 + N_2}$$

A potência aparente do autotransformador ideal é determinada por:

$$S_{auto} = V_A \cdot I_A = (E_1 + E_2) \cdot I_1$$

A potência aparente de um transformador convencional

$$S_{conv} = E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$$

A relação entre essas duas potências fica da seguinte forma:

$$\frac{S_{auto}}{S_{conv}} = 1 + \frac{E_2}{E_1}$$

A relação entre as potências do transformador convencional e do autotransformador.

$$S_{auto} = S_{conv} + S_{conv} \cdot \frac{E_2}{E_1}$$

A partir da relação de potência dos transformadores, tem-se qual a parcela de potência transferida diretamente S_{auto+} pelo autotransformador, ou seja, não por indução magnética, dada por:

$$S_{auto+} \approx S_{conv} \cdot \frac{E_2}{E_1}$$

Vale frisar que estas relações são válidas somente para o caso do autotrafo ligado como abaixador na configuração aditiva, para o caso da utilização como elevador ou configuração subtrativa tais relações deverão ser retrabalhadas.

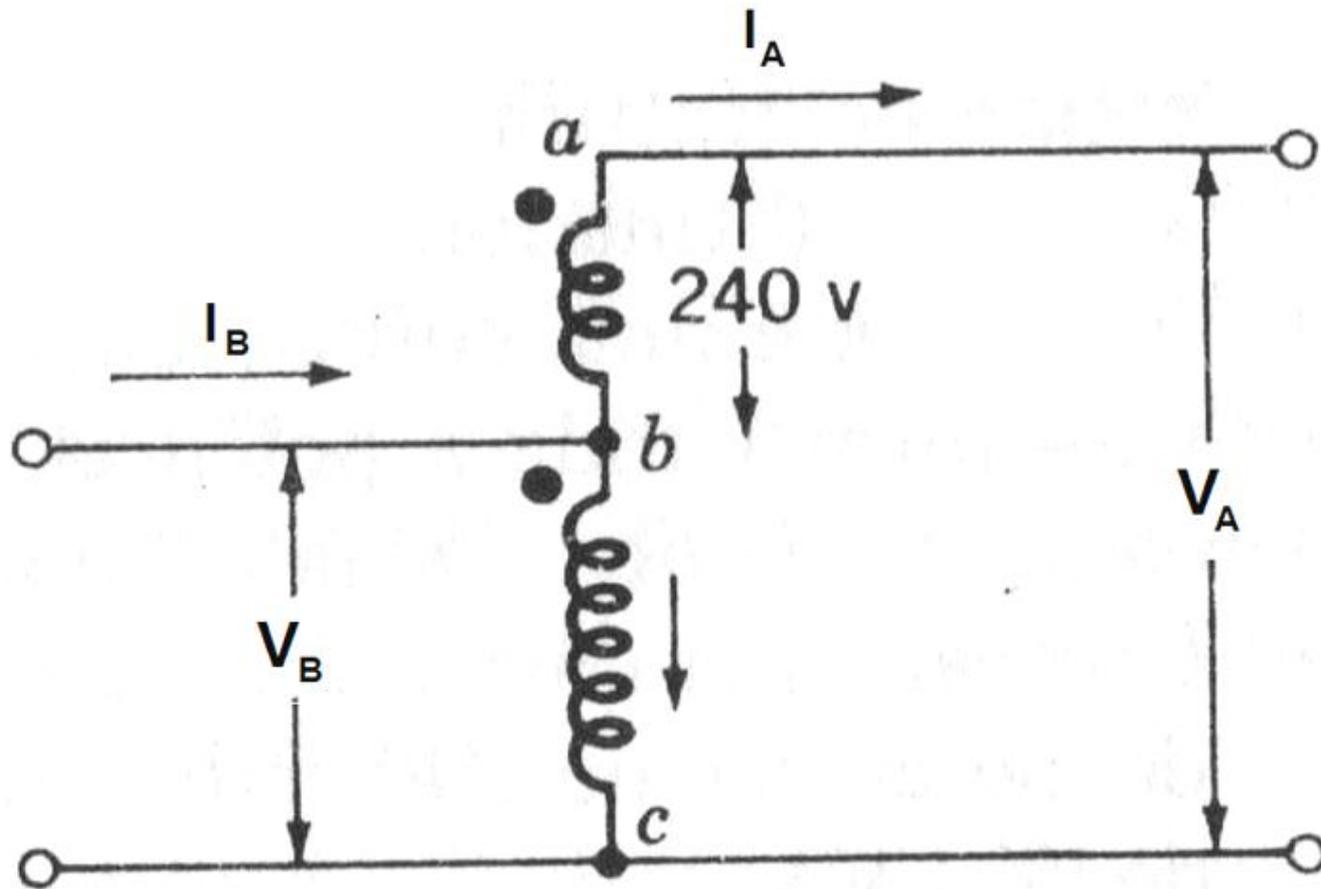
Por exemplo, considerando-se esta mesma configuração, porém utilizando o transformador como elevador, a relação de potência será:

$$S_{auto} = S_{conv} + S_{conv} \cdot \frac{E_1}{E_2}$$

Exercício 10

O transformador de 50kVA, 2.400/240 [V], é ligado como um autotransformador como mostrado na figura a seguir, na qual ab é o enrolamento de 240 [V] e bc é o enrolamento de 2.400 [V]. Supõe-se que o enrolamento de 240 [V] tenha isolamento suficiente de modo que ele pode resistir a uma tensão de 2.640 [V] em relação à terra.

- Calcular as tensões nominais V_A e V_B nos lados de alta tensão e baixa tensão, respectivamente, quando o transformador é ligado como autotransformador;
- Calcular a potência aparente nominal como autotransformador;
- Considerando as perdas totais igual a 803 [W], Determine o rendimento a plena carga como autotransformador, com fator de potência 0,80.



Exercício 11

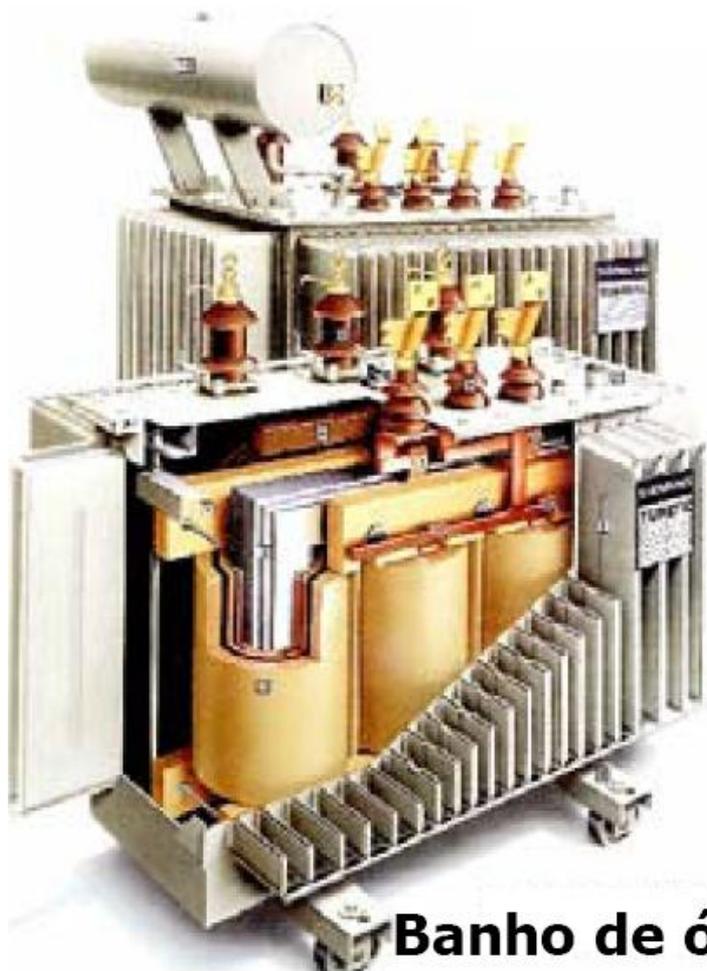
Tomando-se o transformador de 50kVA, 2.400/240 [V] do exercício anterior, e ligando H_2 a X_2 (ligação subtrativa) Como se comportará este transformador? Calcule:

- a) A capacidade original do enrolamento de 240 V;
- b) A capacidade original do enrolamento de 2400 V;
- c) A capacidade do autotrafo tendo o enrolamento V_2 como referência;
- d) Qual o acréscimo percentual?

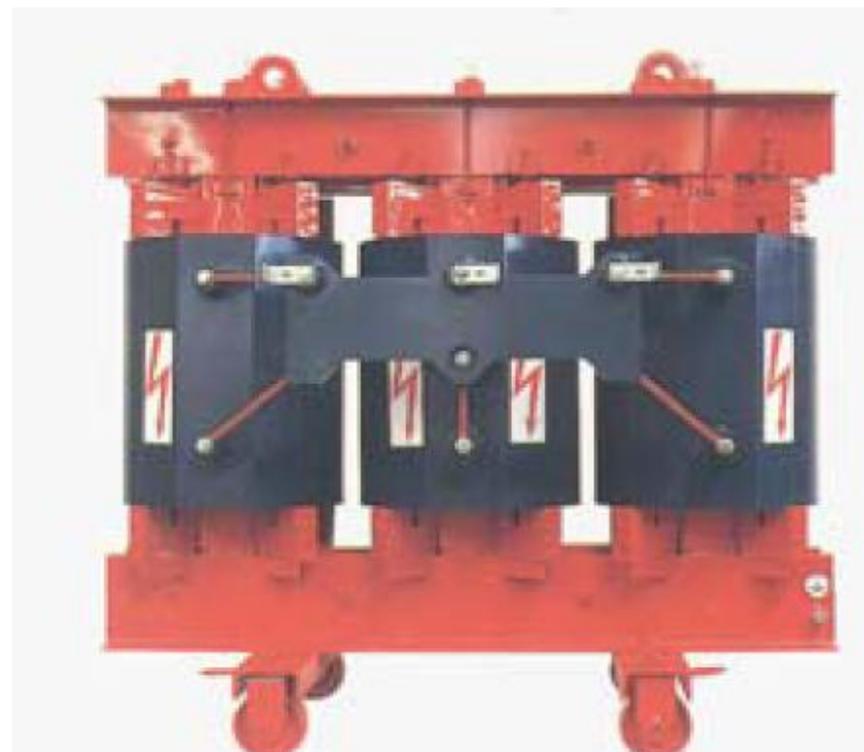
8. Transformadores Trifasicos

- O transformador trifásico é, basicamente, a conexão de três transformadores monofásicos. Em algumas aplicações é usado apenas um circuito magnético. Em outras, o transformador trifásico é composto por três transformadores monofásicos separados.

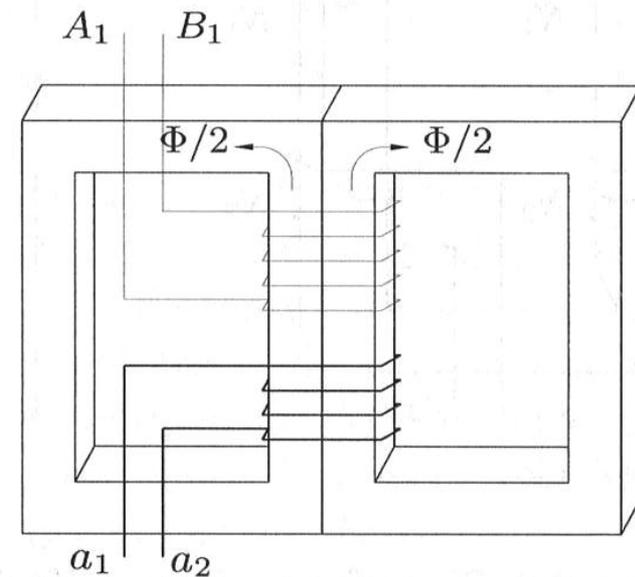
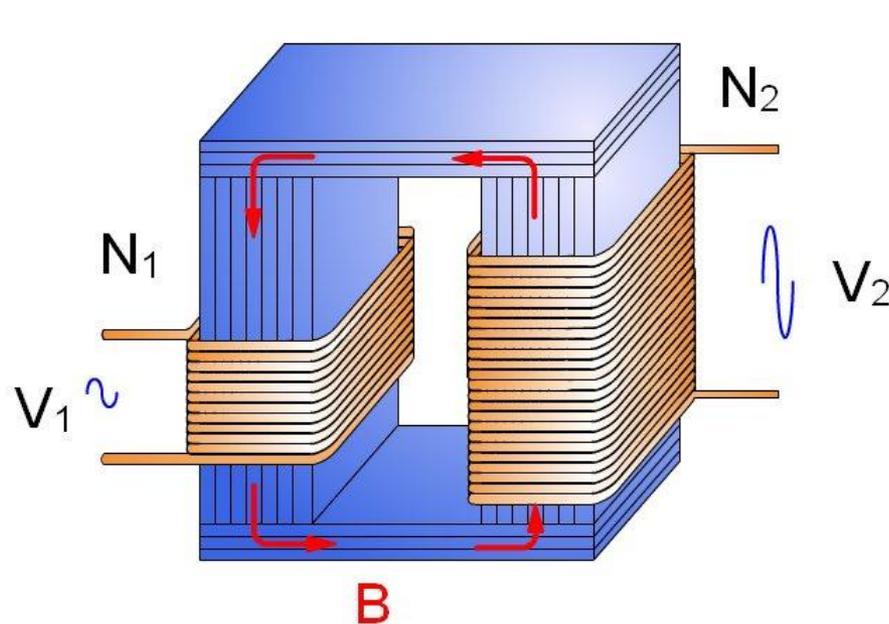




Banho de óleo



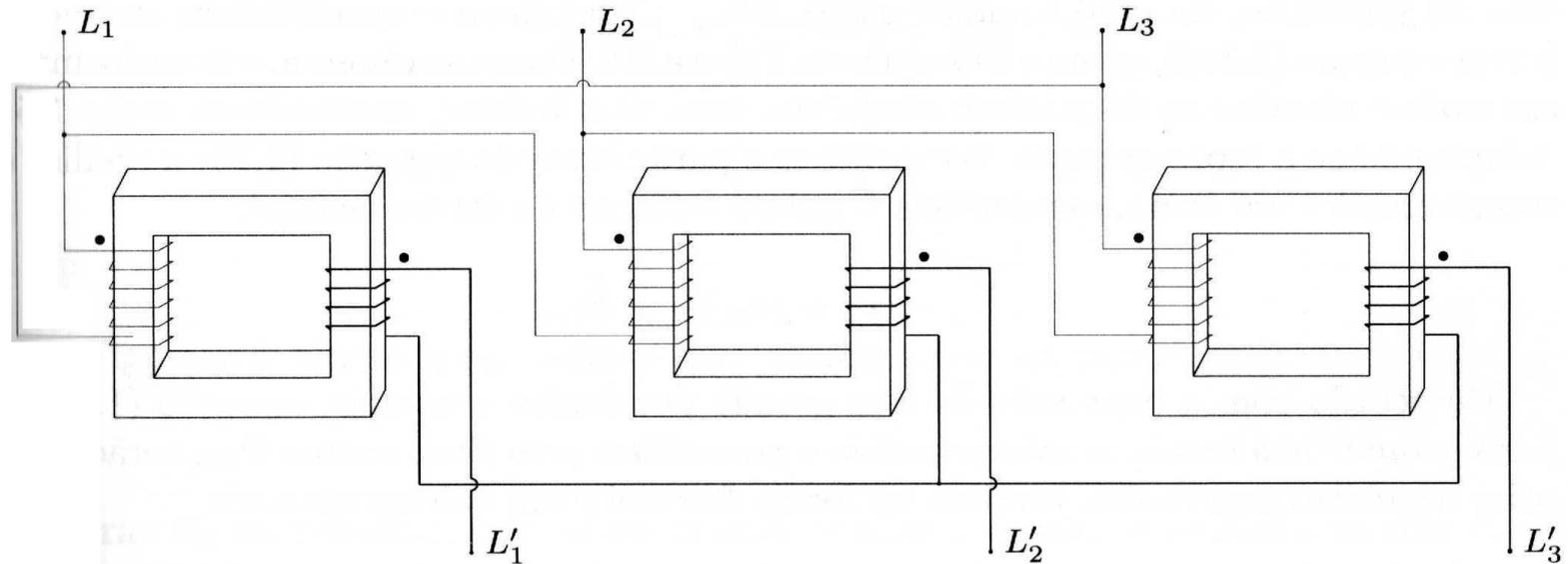
Os transformadores podem ser construídos com núcleo envolvido ou núcleo envolvente.



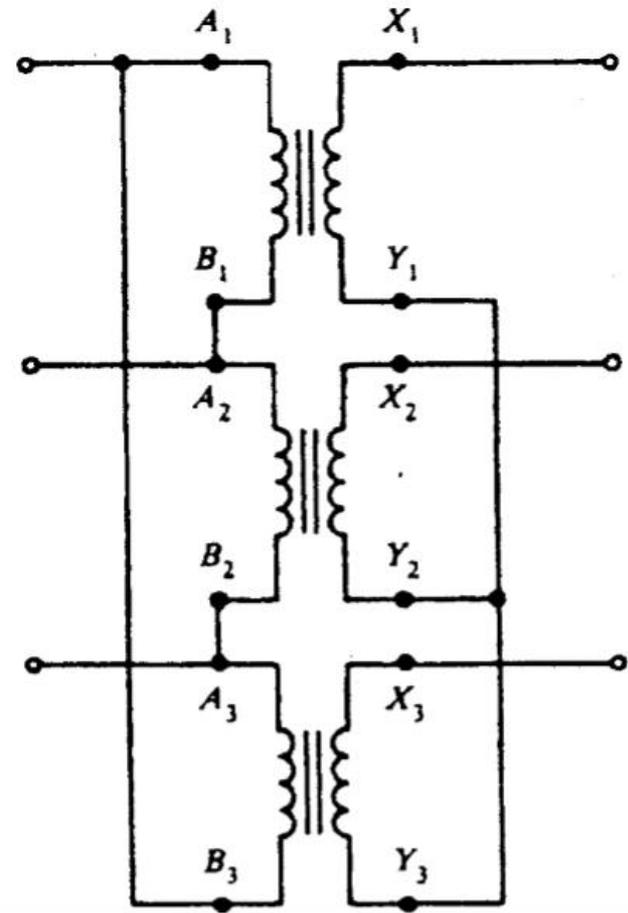
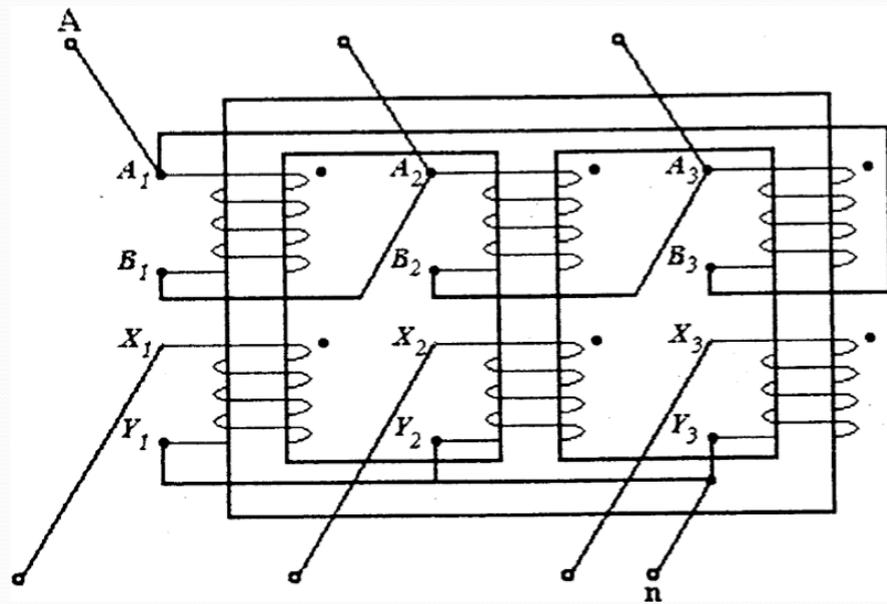
(c) Núcleo envolvente

Transformadores com núcleo envolvente apresentam menor indutância de dispersão.

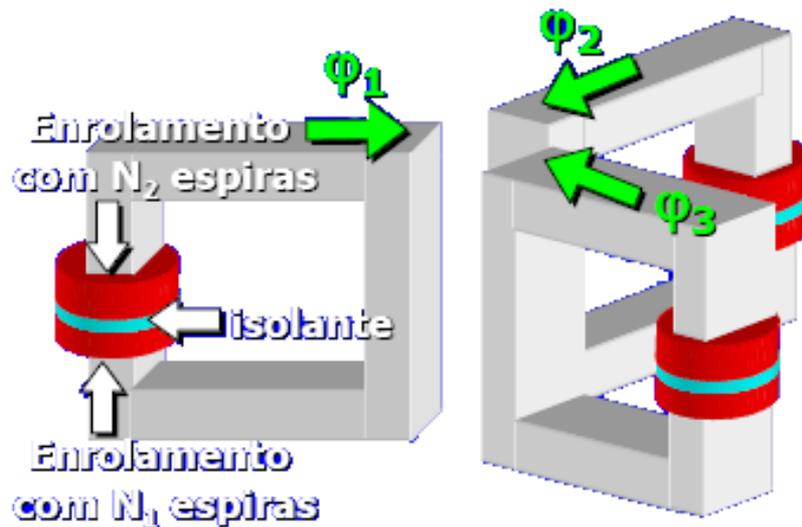
O arranjo trifásico pode ser obtido por três transformadores monofásico independentes



Para caracterizar um sistema trifásico as três tensões de alimentação dos transformadores devem estar defasadas de 120° entre si.

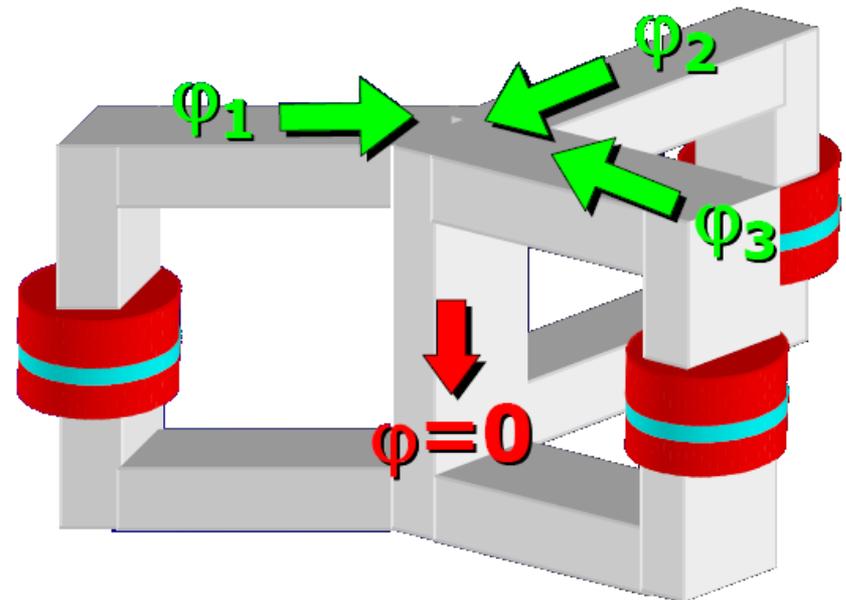


Buscando reduzir a quantidade de material magnético no núcleo realiza-se o arranjo trifásico com um único núcleo.

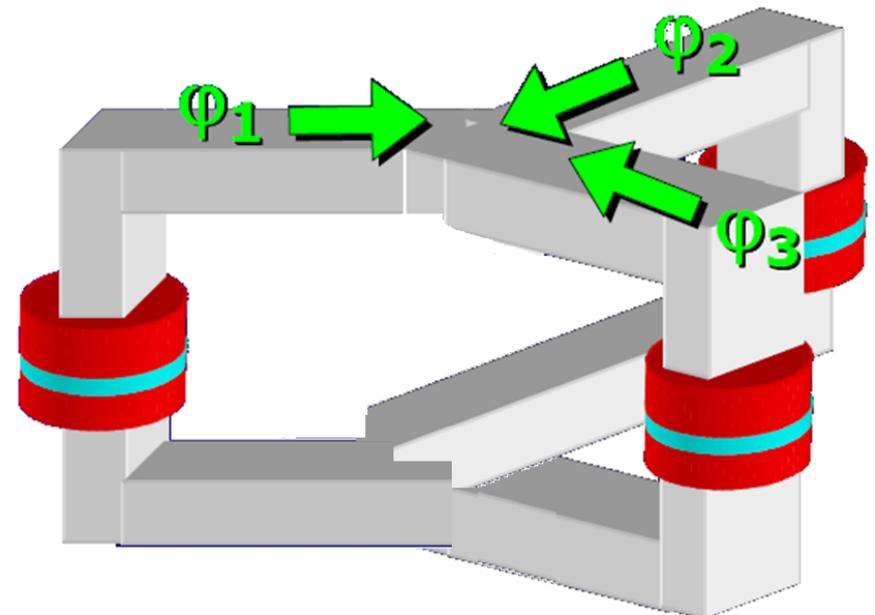
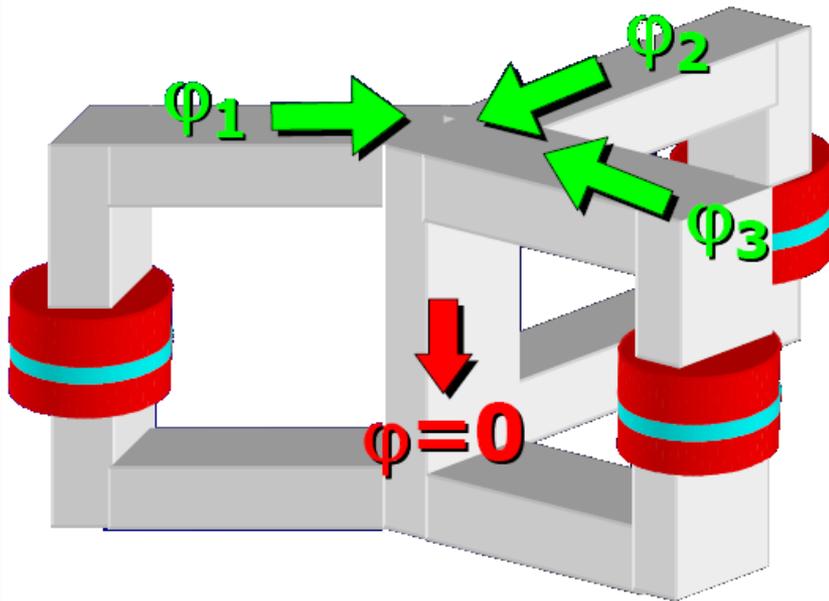


Quando o sistema trifásico está equilibrado com correntes iguais em cada bobina a soma dos fluxos é igual a zero, assim como a soma das correntes.

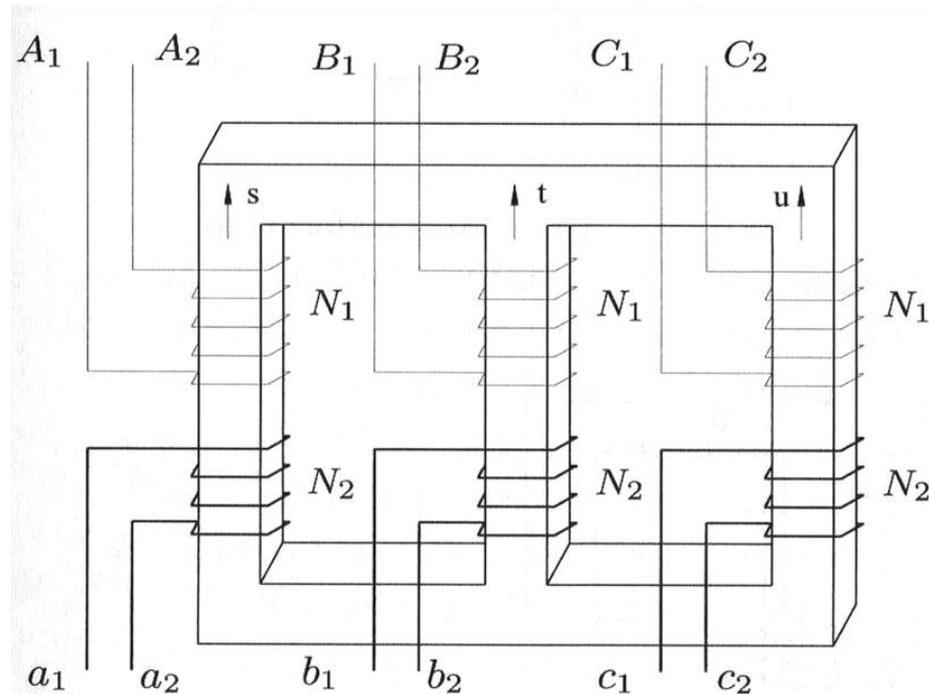
Agrupamento de três transformadores monofásicos formando um transformador trifásico.



Como o fluxo no núcleo central é igual a zero, se retiramos esse ramo não vai alterar em nada o comportamento do transformador.



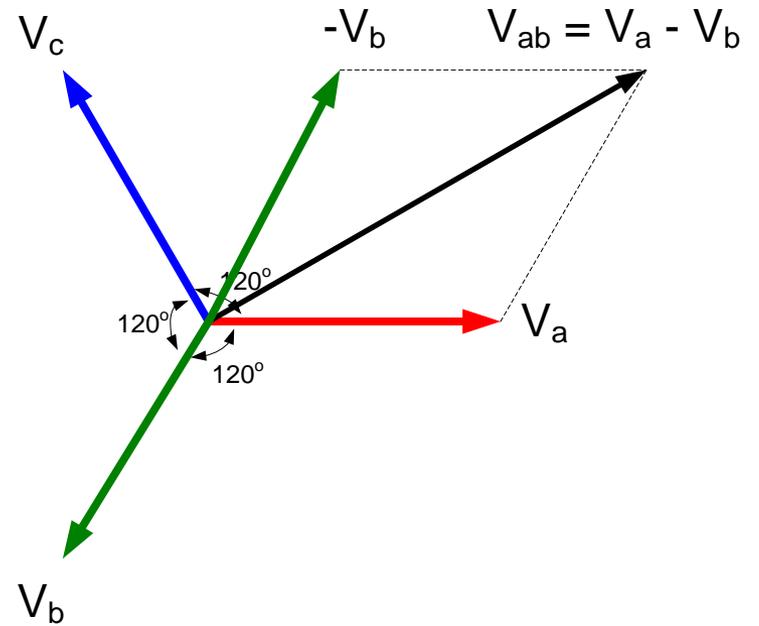
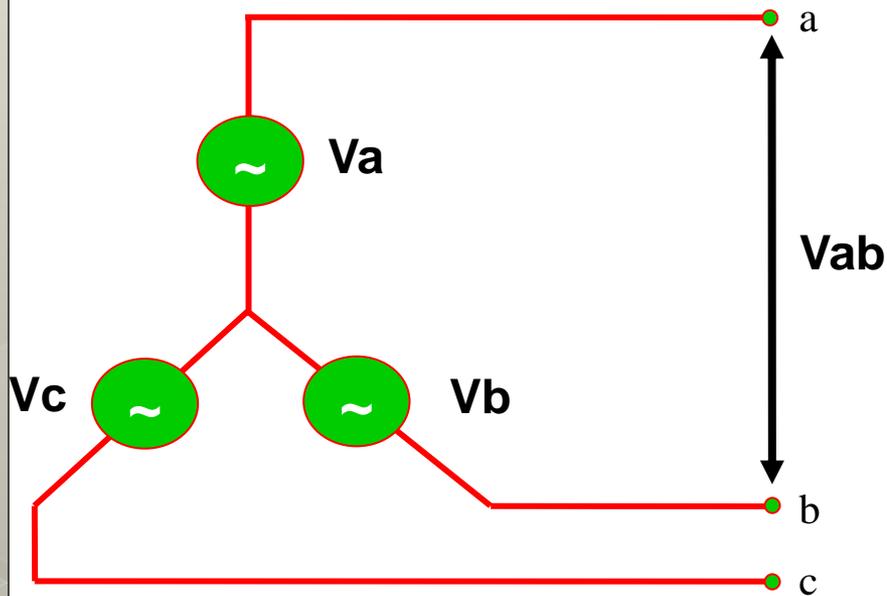
Podemos visualizar o transformador trifásico conforme apresentado abaixo.



(a) Núcleo envolvido

Os transformadores trifásicos podem ser ligados em estrela ou triângulo.

Sistema trifásico



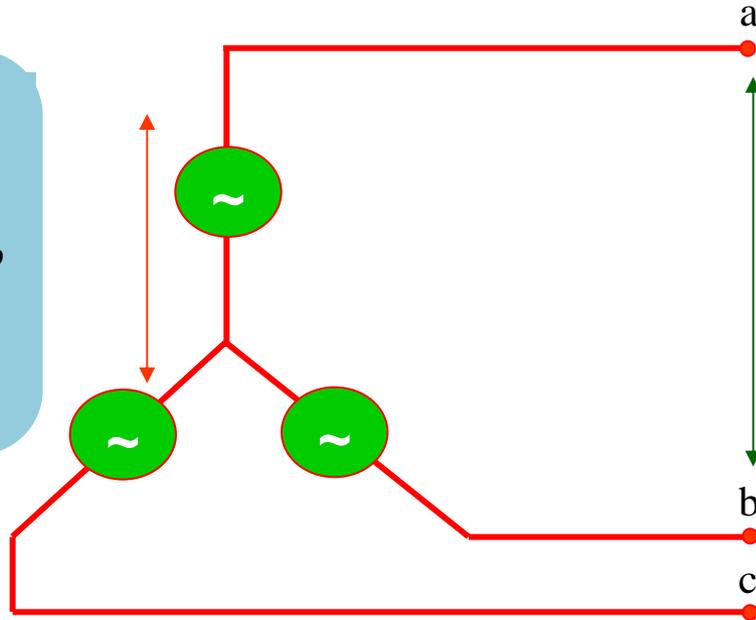
Tensões de linha

$$V_{AB} = A_A - V_B = \sqrt{3} \cdot V \angle 30^\circ$$

Tensões de fase e de linha

Tensões de fase

$$\begin{aligned}V_a &= V \angle 0^\circ \\V_b &= V \angle -120^\circ \\V_c &= V \angle 120^\circ\end{aligned}$$



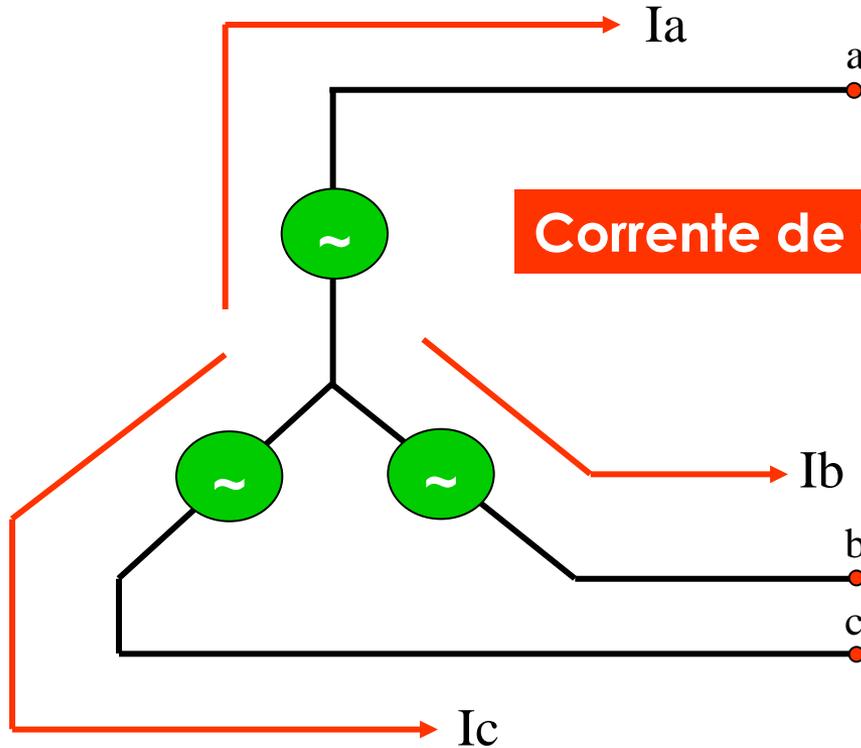
Tensões de linha

$$\begin{aligned}V_{ab} &= V_a - V_b = \sqrt{3}V \angle 30^\circ \\V_{bc} &= V_b - V_c = \sqrt{3}V \angle -90^\circ \\V_{ca} &= V_c - V_a = \sqrt{3}V \angle 150^\circ\end{aligned}$$

Tensões de linha

$$\begin{aligned}V_{ab} &= \sqrt{3}V_a \angle 30^\circ \\V_{bc} &= \sqrt{3}V_b \angle 30^\circ \\V_{ca} &= \sqrt{3}V_c \angle 30^\circ\end{aligned}$$

Corrente de fase e de linha



Corrente de fase = Corrente de linha

Seqüência Direta

Tensão de linha = $\sqrt{3}$ Tensão de Fase /30°

Corrente de fase = Corrente de linha

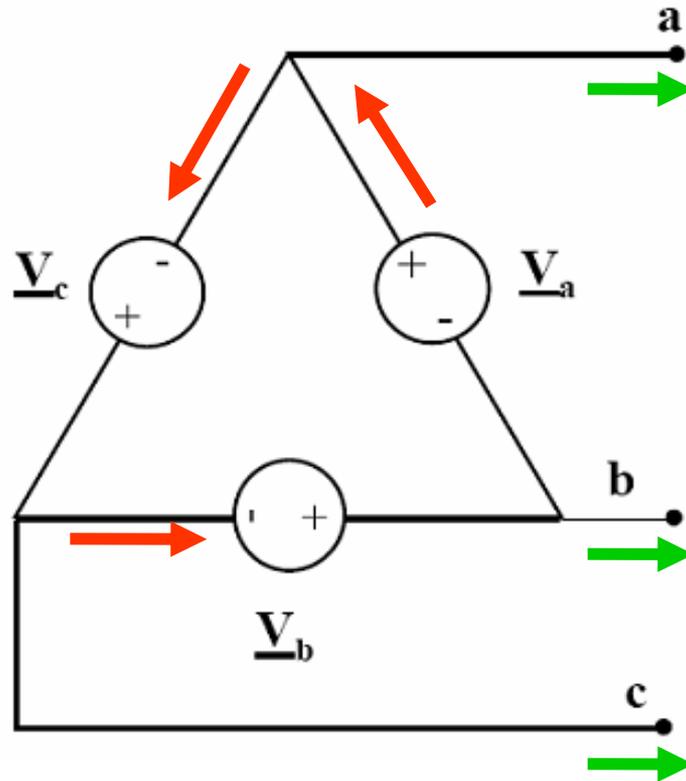
Corrente de fase e de linha

Corrente de fase

$$\underline{I}_a$$

$$\underline{I}_b$$

$$\underline{I}_c$$



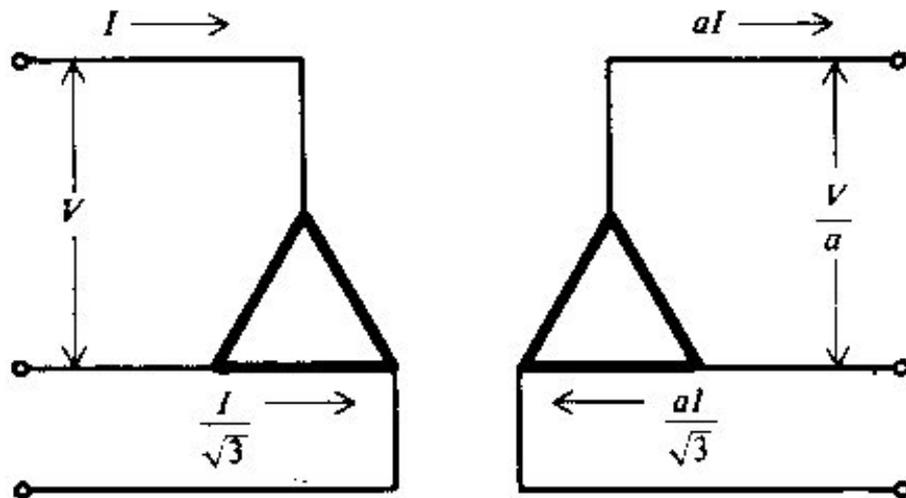
Corrente de linha

$$I_{ab} = I_a - I_b = \sqrt{3}I \angle 30^\circ$$
$$I_{bc} = I_b - I_c = \sqrt{3}I \angle -90^\circ$$
$$I_{ca} = I_c - I_a = \sqrt{3}I \angle 150^\circ$$

Seqüência Direta

Corrente de linha = $\sqrt{3}$ Corrente de Fase $\angle 30^\circ$

Transformadores trifásico Triângulo - triângulo



Primário

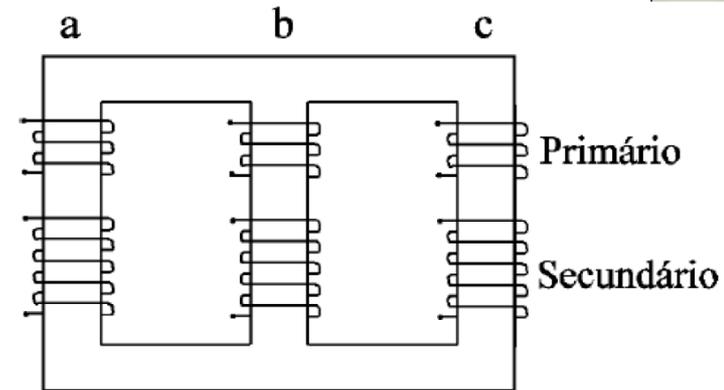
Secundário

$$\frac{V_{Fase,1}}{V_{Fase,2}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

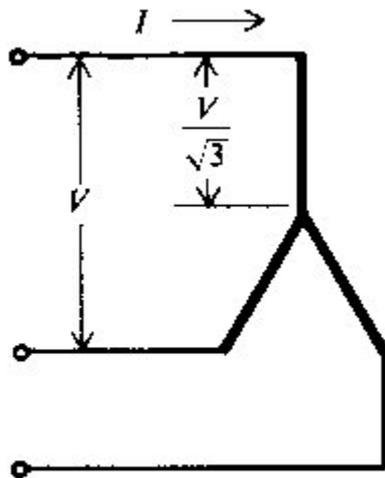
$$\frac{I_{Fase,1}}{I_{Fase,2}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

$$\frac{V_{Linha,1}}{V_{Linha,2}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$\frac{I_{Linha,1}}{I_{Linha,2}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$



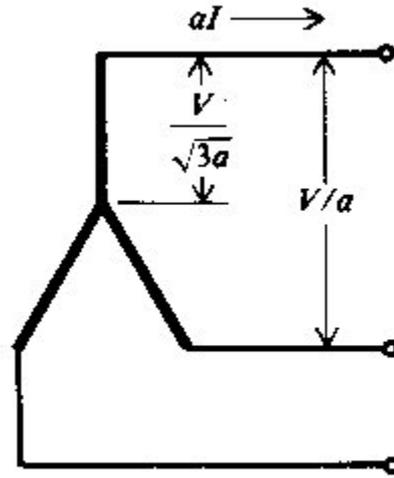
Transformadores trifásico Estrela - estrela



Primário

$$\frac{V_{Fase,1}}{V_{Fase,2}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

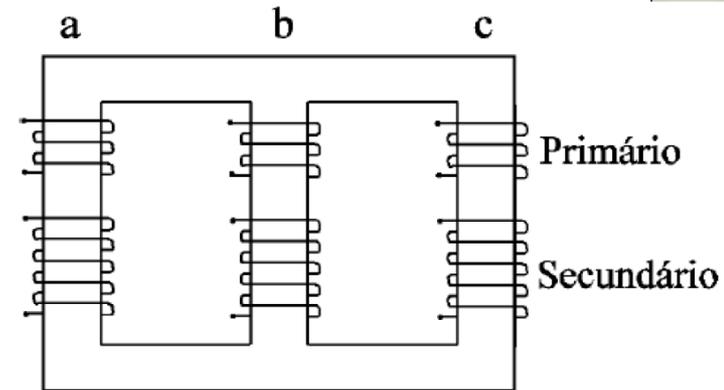
$$\frac{V_{Linha,1}}{V_{Linha,2}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$



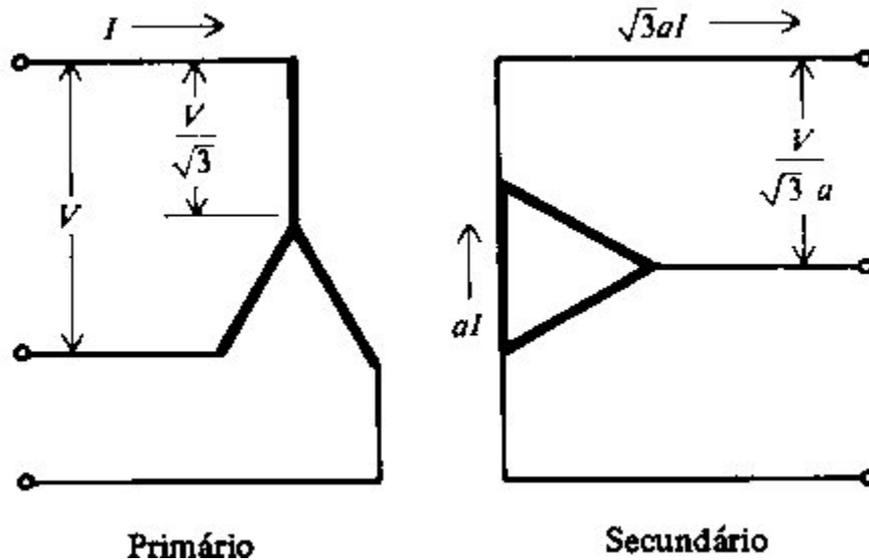
Secundário

$$\frac{I_{Fase,1}}{I_{Fase,2}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

$$\frac{I_{Linha,1}}{I_{Linha,2}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

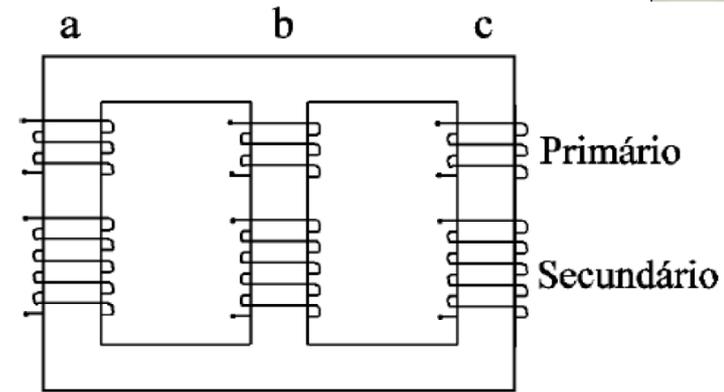


Transformadores trifásico Estrela - triângulo



Primário

Secundário



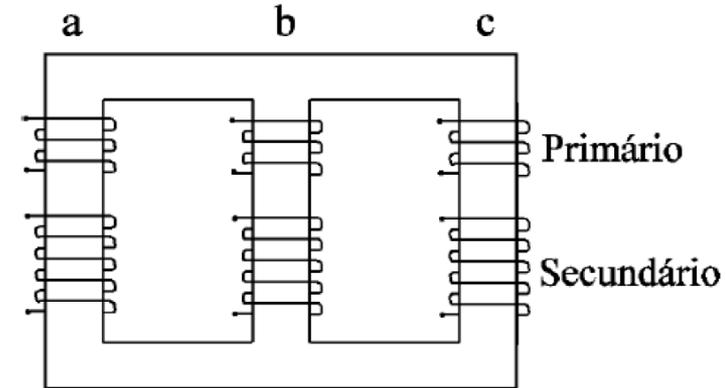
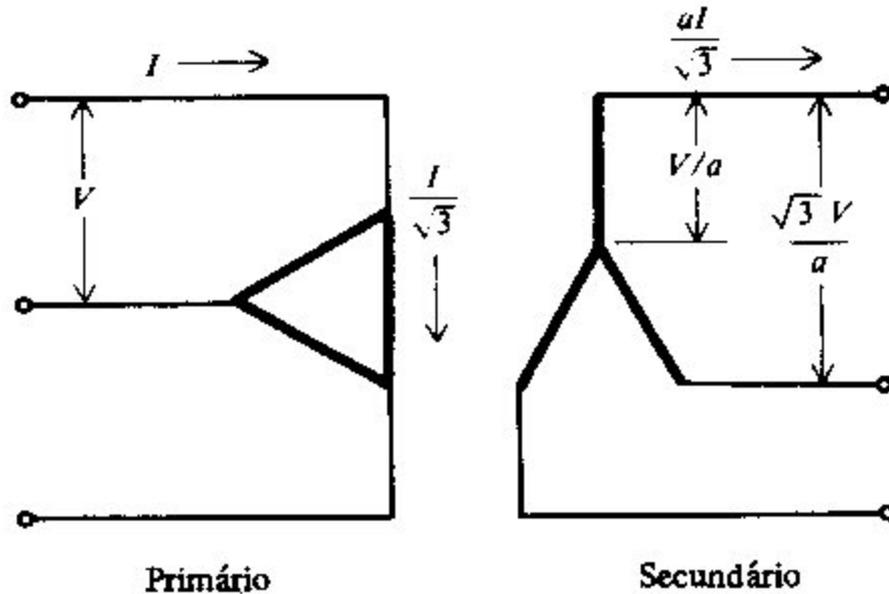
$$\frac{V_{Fase,Y}}{V_{Fase,\Delta}} = \frac{N_Y}{N_\Delta}$$

$$\frac{I_{Fase,Y}}{I_{Fase,\Delta}} = \frac{N_\Delta}{N_Y}$$

$$\frac{V_{Linha,\Delta}}{V_{Linha,Y}} = \frac{\sqrt{3} \cdot N_Y}{N_\Delta}$$

$$\frac{I_{Linha,\Delta}}{I_{Linha,Y}} = \frac{N_\Delta}{\sqrt{3} \cdot N_Y}$$

Transformadores trifásico Triângulo - estrela



$$\frac{V_{Fase,\Delta}}{V_{Fase,Y}} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y}$$

$$\frac{I_{Fase,\Delta}}{I_{Fase,Y}} = \frac{N_Y}{N_{\Delta}}$$

$$\frac{V_{Linha,\Delta}}{V_{Linha,Y}} = \frac{N_{\Delta}}{\sqrt{3} \cdot N_Y}$$

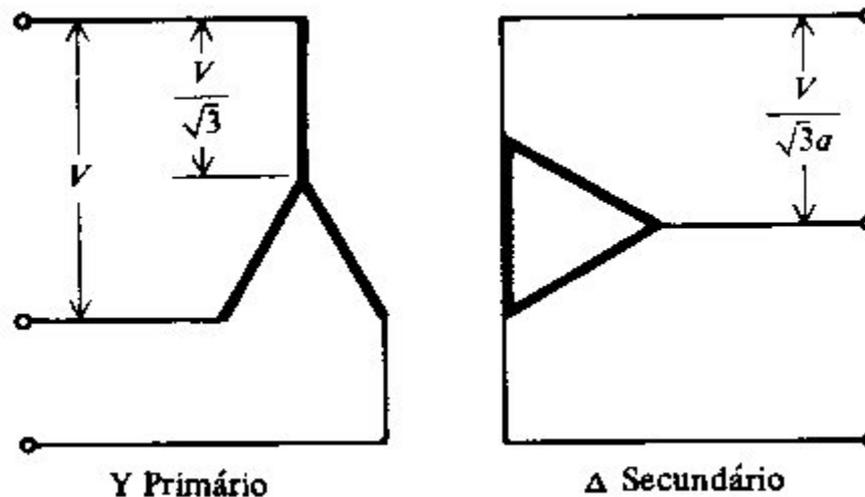
$$\frac{I_{Linha,\Delta}}{I_{Linha,Y}} = \frac{\sqrt{3} \cdot N_Y}{N_{\Delta}}$$

Relação de transformação de trafos trifásicos.

Ligação do Transformador (primário e secundário)	PRIMÁRIO				SECUNDÁRIO			
	Linha		Fase		Linha		Fase	
	<i>Tensão</i>	<i>Corrente</i>	<i>Tensão</i>	<i>Corrente</i>	<i>Tensão</i>	<i>Corrente</i>	<i>Tensão</i>	<i>Corrente</i>
Δ - Δ	V	I	V	$I/\sqrt{3}$	V/a	$a \cdot I$	V/a	$a \cdot I/\sqrt{3}$
Y-Y	V	I	$V/\sqrt{3}$	I	V/a	$a \cdot I$	$V/\sqrt{3} \cdot a$	$a \cdot I$
Y- Δ	V	I	$V/\sqrt{3}$	I	$V/\sqrt{3} \cdot a$	$\sqrt{3} \cdot a \cdot I$	$V/\sqrt{3} \cdot a$	$a \cdot I$
Δ -Y	V	I	V	$I/\sqrt{3}$	$\sqrt{3} \cdot V/a$	$a \cdot I/\sqrt{3}$	V/a	$a \cdot I/\sqrt{3}$

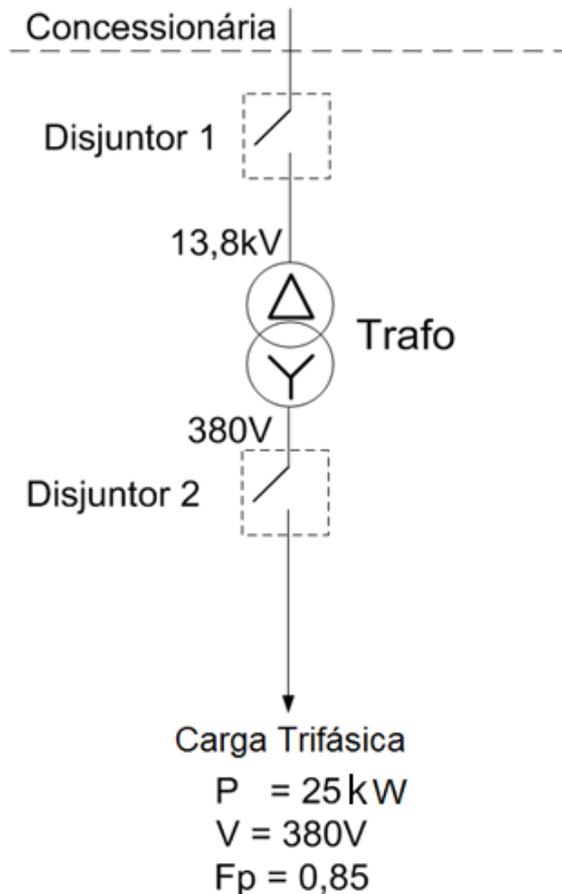
Exercício 12

Numa ligação Y- Δ trifásica, cada transformador tem uma razão de tensão de 4:1. Se a tensão da linha do primário for de 660 V, calcular (a) a tensão da linha do secundário, (b) a tensão através de cada enrolamento do primário, e (c) a tensão através de cada enrolamento do secundário.



Exercício 13

Especifique as correntes nominais “mínimas” dos disjuntores 1 e 2 em condições normais de operação.



Exercício 14

Transformador trifásico conectado em delta-estrela ou em estrela-delta podem ser ligados em paralelo com transformadores trifásicos estrela-estrela? Justifique a resposta.

Exercício 15

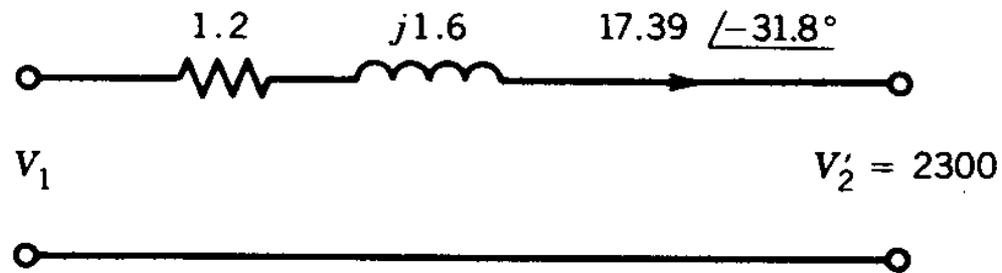
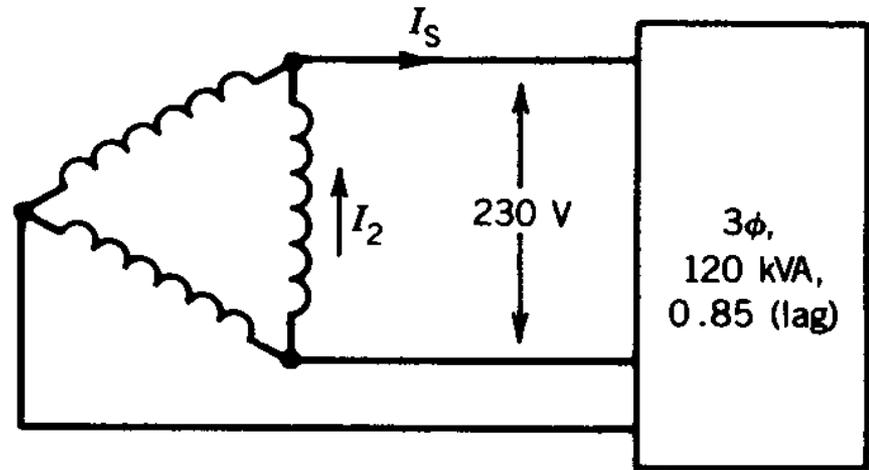
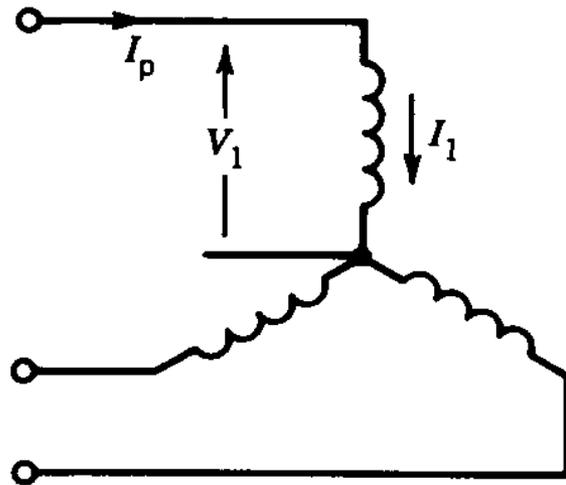
Uma fábrica drena 100 A com $\cos\theta=0,7$ em atraso, do secundário de uma bancada transformadora (3 trafos monofásicos) de distribuição de 60 kVA, 2.300/230 V, ligada em Y- Δ , calcule:

- A potência real consumida em kW e a aparente em kVA;
- As correntes secundárias nominais de fase e de linha da bancada;
- O percentual de carga para cada transformador;
- As correntes primárias de fase e de linha de cada transformador;
- A capacidade em kVA de cada transformador.

Exercício 16

Três transformadores monofásicos de 50 [kVA], 2300/230 [V], 60 [Hz] são conectados para formar um transformador trifásico de 4000/230 [V]. A impedância equivalente de cada transformador referido ao lado de baixa tensão é $0,012 + j0,016$ [Ω] (circuito equivalente modificado do transformador). O transformador resultante trifásico alimenta uma carga trifásica de 120 [kVA], 230 [V] e fator de potência de 0,85 indutivo na carga. Com base nessas informações responda:

- Desenhe o diagrama esquemático mostrando as conexões dos transformares;
- Determine a corrente nos enrolamentos do transformador;
- Determine a tensão de linha requerida no primário do transformador;
- Determine a regulação de tensão do transformador.



(a) The connection diagram is shown in Fig. E2.7a. The high-voltage windings are to be connected in wye so that the primary can be connected to the 4000 V supply. The low-voltage winding is connected in delta to form a 230 V system for the load.

(b)
$$I_s = \frac{120,000}{\sqrt{3} \times 230} = 301.24 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{301.24}{\sqrt{3}} = 173.92 \text{ A}$$

$$a = \frac{2300}{230} = 10$$

$$I_1 = \frac{173.92}{10} = 17.39 \text{ A}$$

(c) Computation can be carried out on a per-phase basis.

$$\begin{aligned} Z_{\text{eq1}} &= (0.012 + j0.016)10^2 \\ &= 1.2 + j1.6 \Omega \end{aligned}$$

$$\phi = \cos^{-1} 0.85 = 31.8^\circ$$

The primary equivalent circuit is shown in Fig. E2.7*b*.

$$V_1 = 2300 \angle 0^\circ + 17.39 \angle -31.8^\circ (1.2 + j1.6)$$

$$|V_1| = 2332.4 \text{ V}$$

$$\text{Primary line-to-line voltage} = \sqrt{3} V_1 = 4039.8 \text{ V}$$

(d)
$$\text{VR} = \frac{2332.4 - 2300}{2300} \times 100\% = 1.41\% \quad \blacksquare$$