

Eletrotécnica

Módulo II – Parte II Transformadores

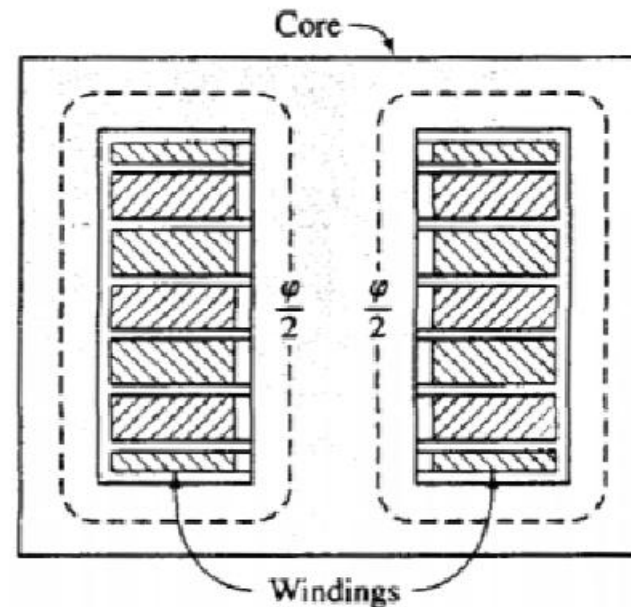
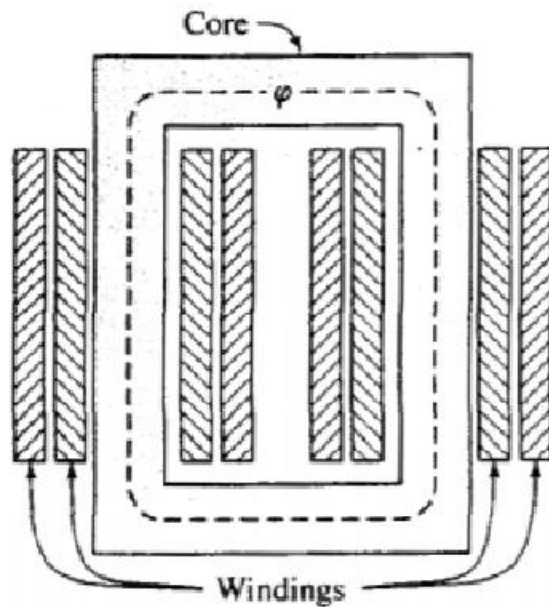


Transformadores

- Dispositivo capaz de transferir energia elétrica de um circuito a outro, sem conexão elétrica
- Tornaram viáveis a transmissão de energia a grandes distâncias
- Elevada eficiência
- Alta robustez
- Ampla faixa de potências

Transformadores

- Essencialmente, um transformador consiste de dois ou mais enrolamentos acoplados por um fluxo magnético variável

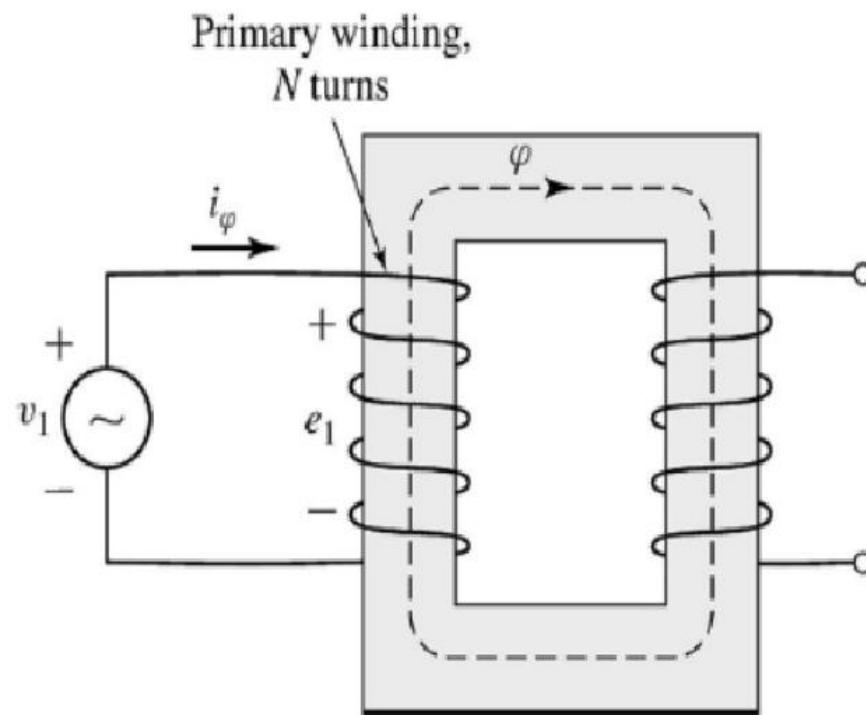


Transformadores

- O caminho percorrido pelo fluxo magnético é feito com lâminas de material magnético (usualmente aço-silício)
- Densidade de fluxo magnético de até 1,5T são normalmente utilizadas
- As lâminas são isoladas entre si (verniz) para reduzir as correntes de Foucault

Transformadores – Operação à Vazio

- A figura abaixo ilustra o circuito magnético de um transformador elementar:



v_1 – tensão aplicada

i_ϕ – corrente de excitação

e_1 – tensão induzida

ϕ - fluxo magnético

N – número de espiras do primário

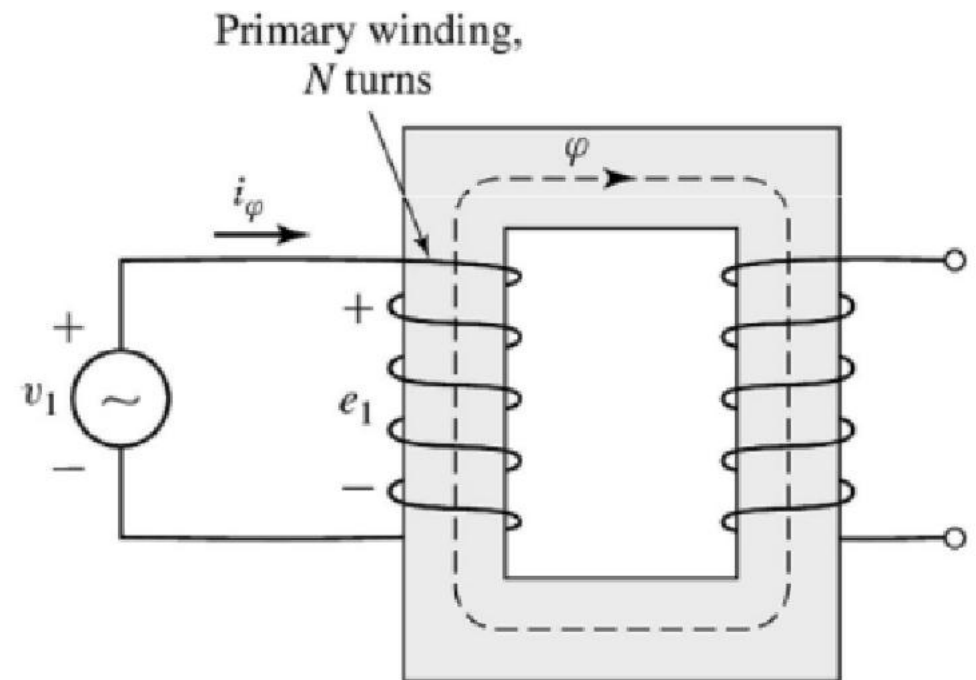
r_1 – resistência do enrolamento

Transformadores – Operação à Vazio

- Equações das grandezas elétricas

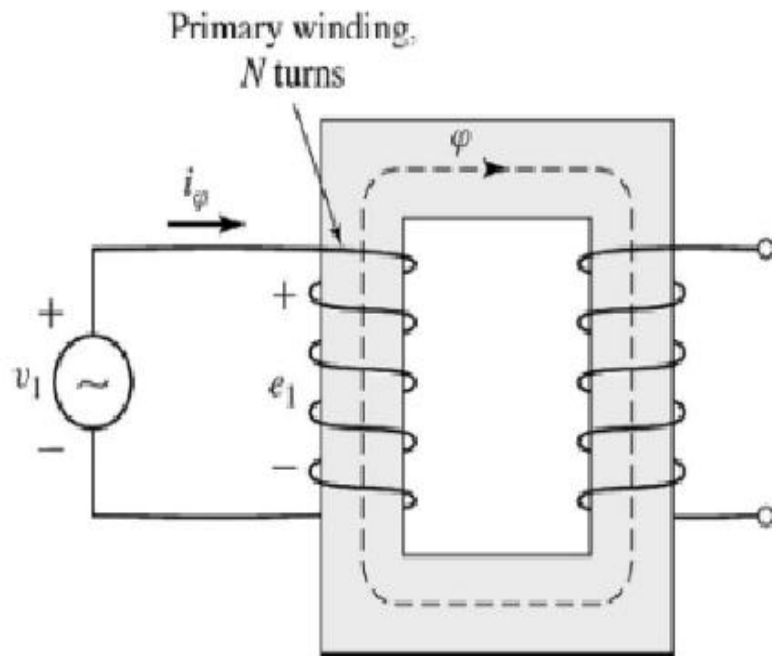
$$e_1 = \frac{d(N\phi)}{dt} = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$v_1 = e_1 + r_1 \cdot i_\phi$$



Transformadores – Operação à Vazio

- Se r_1 é muito pequena e a excitação é senoidal:



$$\phi = \phi_{max} \sin(\omega.t)$$

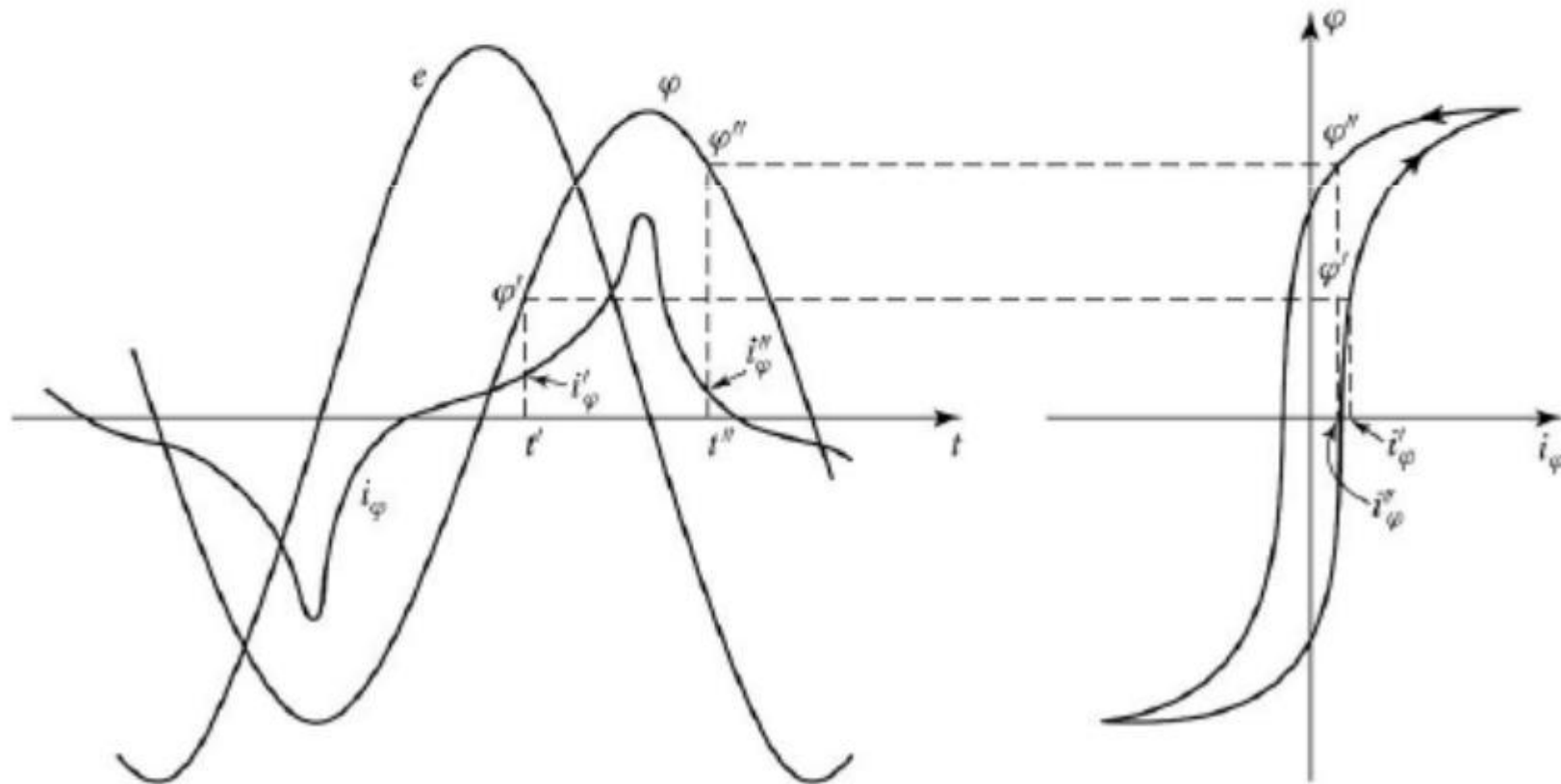
$$e_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = \omega \phi_{max} \cos(\omega.t)$$

$$E_1 = N_1 \cdot f \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \cdot f \cdot \phi_{max}$$

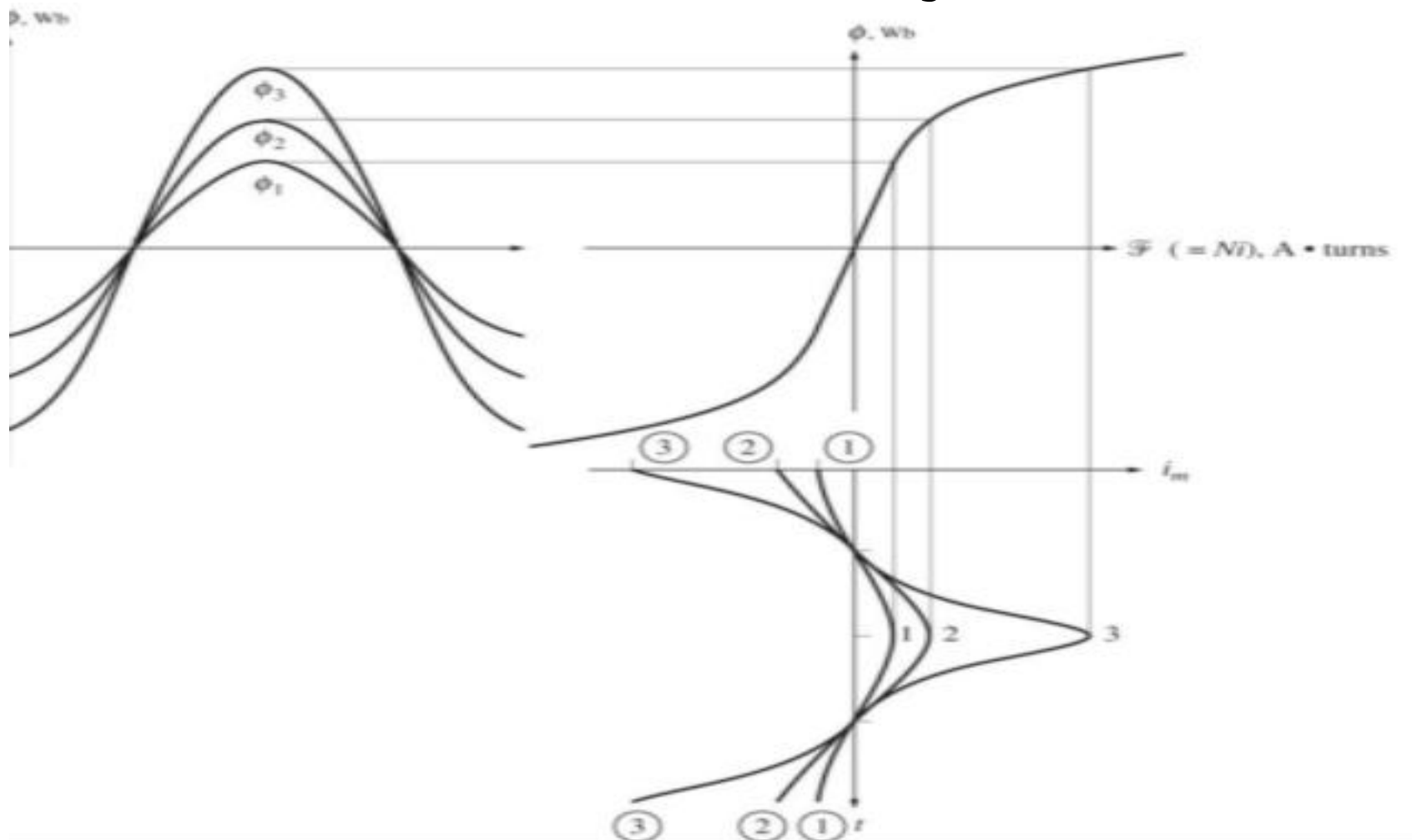
$$\phi_{max} = \frac{V_1}{\sqrt{2} \cdot f N_1}$$

Transformadores – Operação à Vazio

- Devido à saturação magnética, a corrente de magnetização é normalmente distorcida.

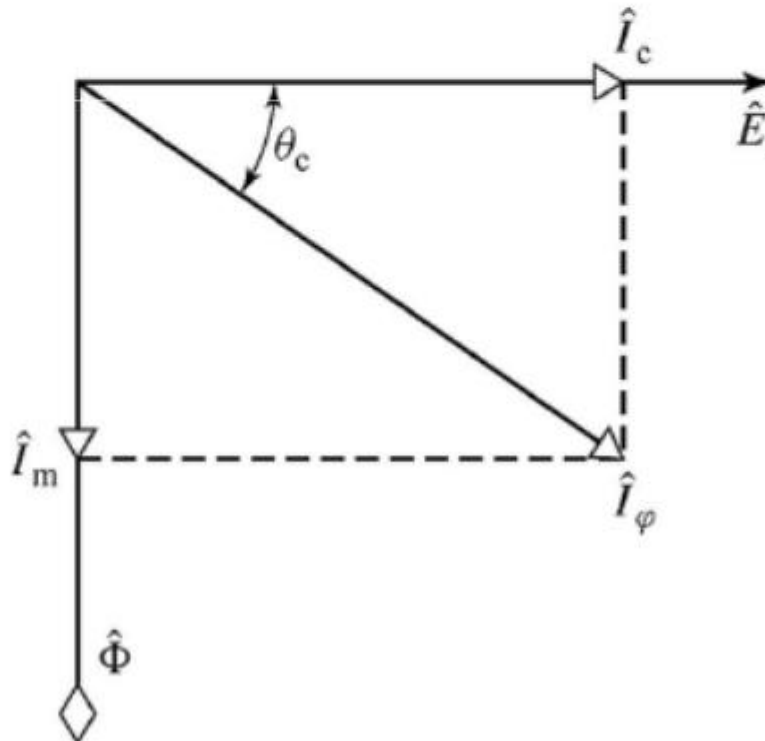


Efeito da saturação



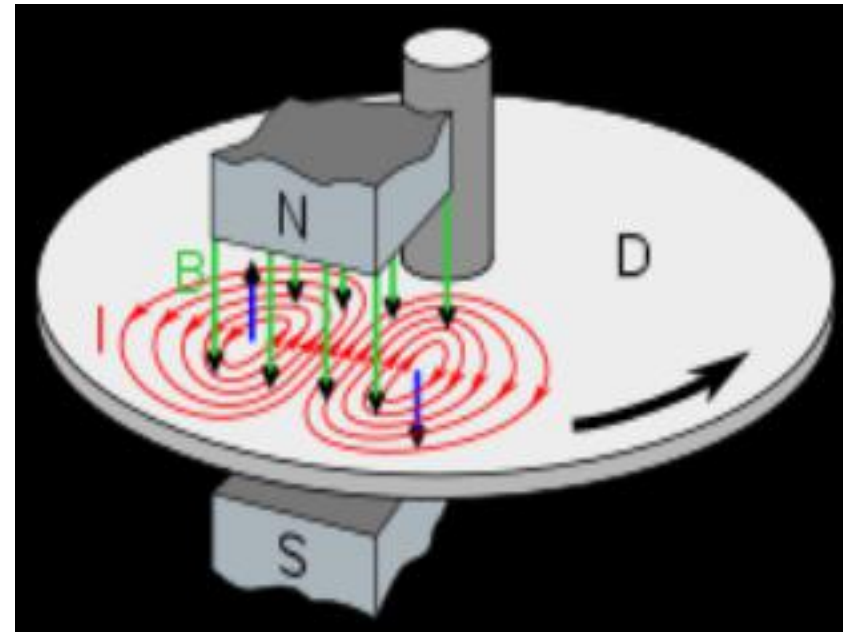
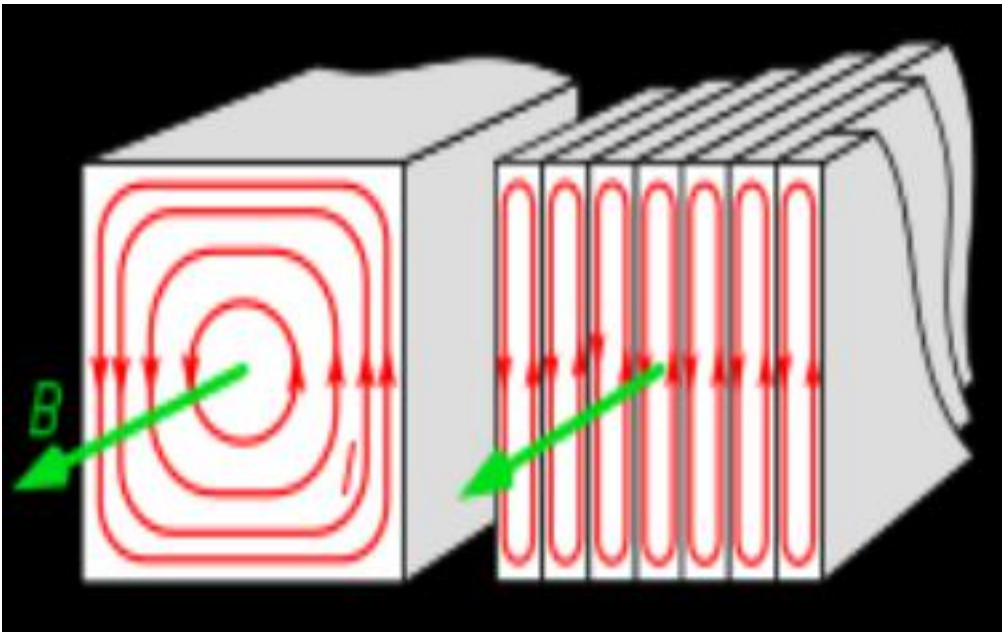
Transformadores – Operação à Vazio

- A corrente de excitação pode ser decomposta em duas parcelas: uma em fase com a tensão (perdas magnéticas) e outra atrasada de 90° .



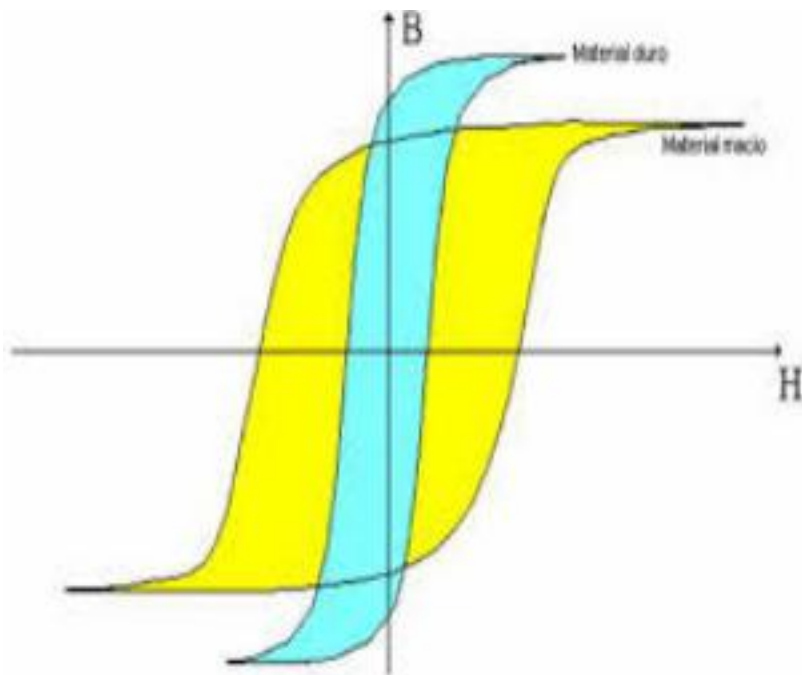
Operação à Vazio-Perdas

- Correntes de Foucault

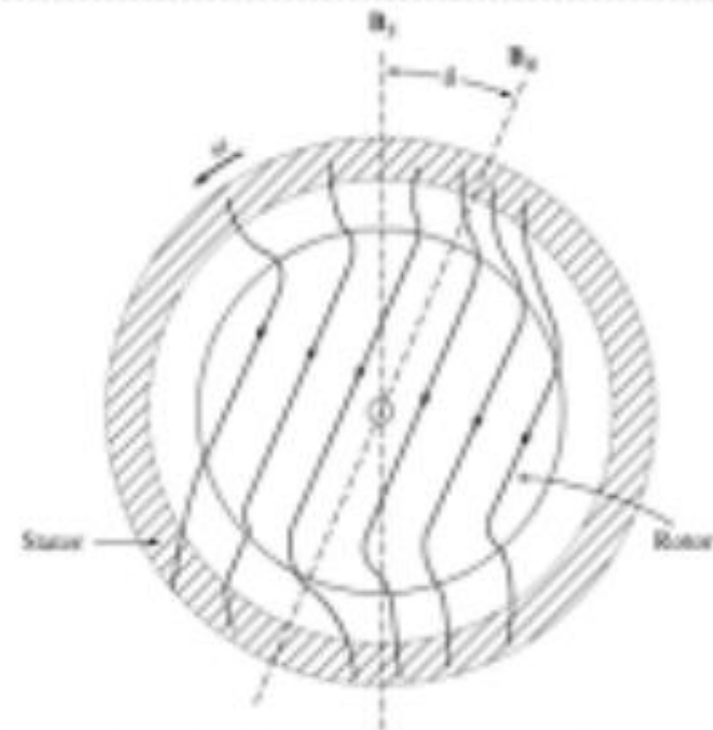


Operação à Vazio-Perdas

- Histerese

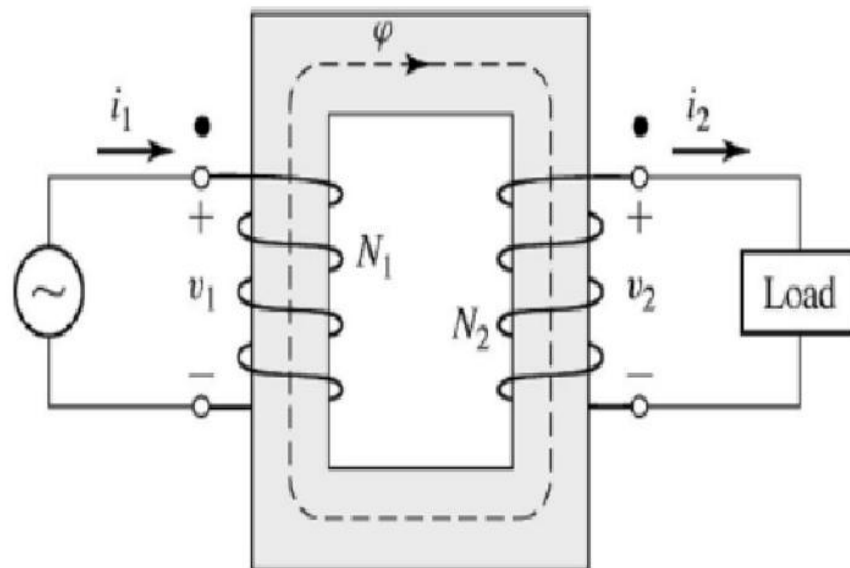


Motor à histerese



Transformador Ideal – Operação sob Carga

- Considerações:
 - Não há perdas resistivas ou magnéticas
 - Não há saturação magnética
 - Não há fluxo de dispersão



$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}, \quad v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$v_1 \cdot i_1 = v_2 \cdot i_2$$

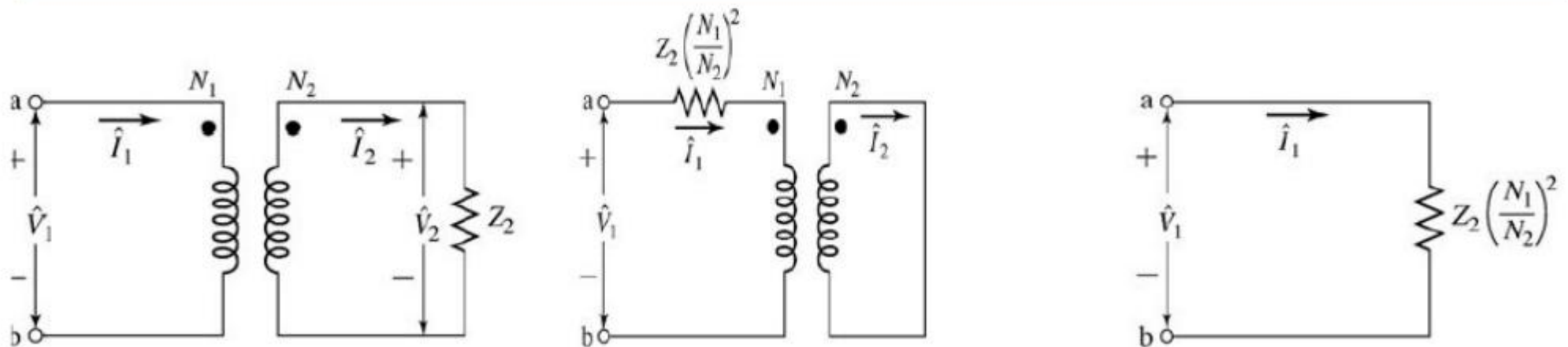
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Transformador Ideal – Operação sob Carga

- Em um transformador ideal, como não há perdas:

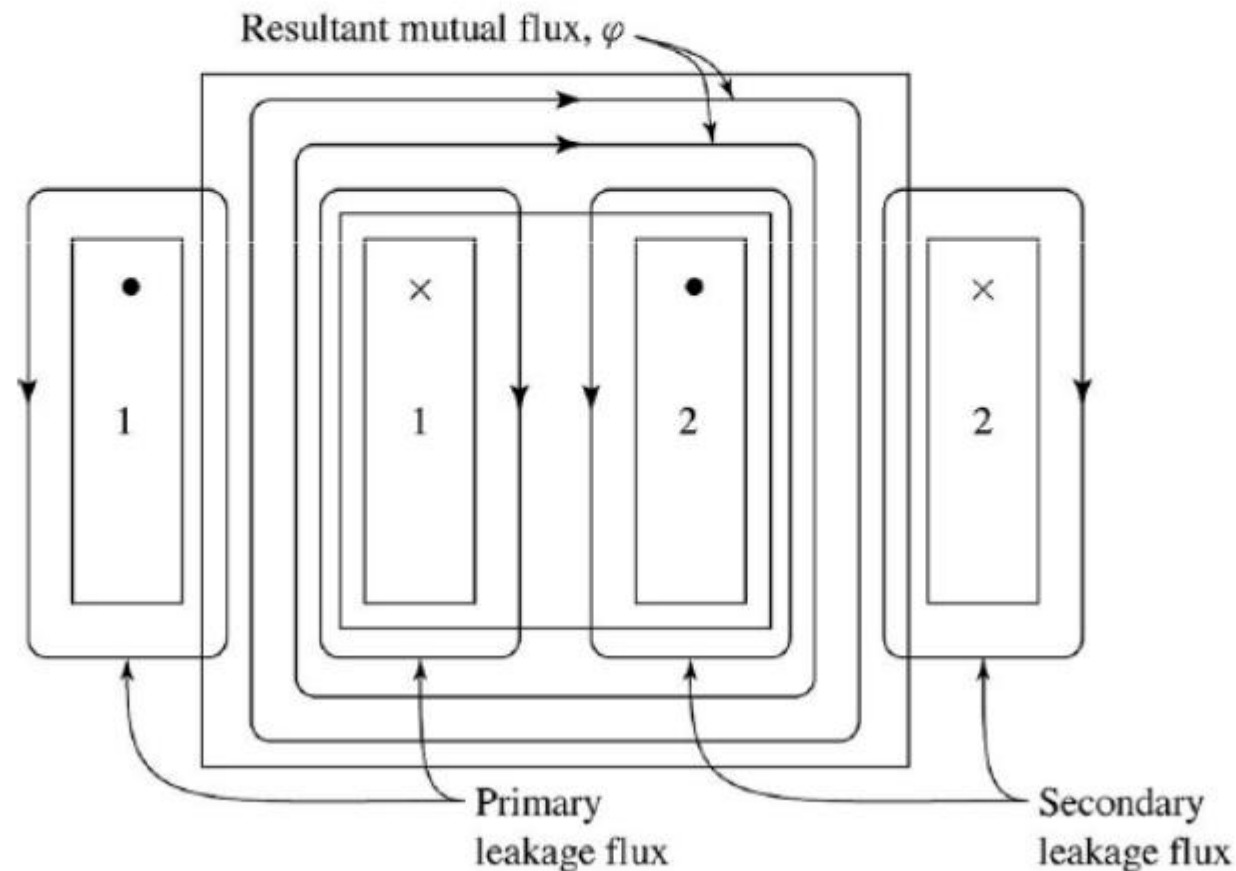
$$v_1 i_1 = v_2 i_2$$

- Desta forma, tem-se a transformação de impedâncias entre primário e secundário, conforme ilustrado.



Transformador – Reatâncias e Circuito Equivalente

- O desenho abaixo ilustra as distribuições básicas de fluxo em um transformador.



Transformador Real Perdas

$$P_2 = P_1 + P_{co} + P_{fe}$$

P_2 potencia no secundário

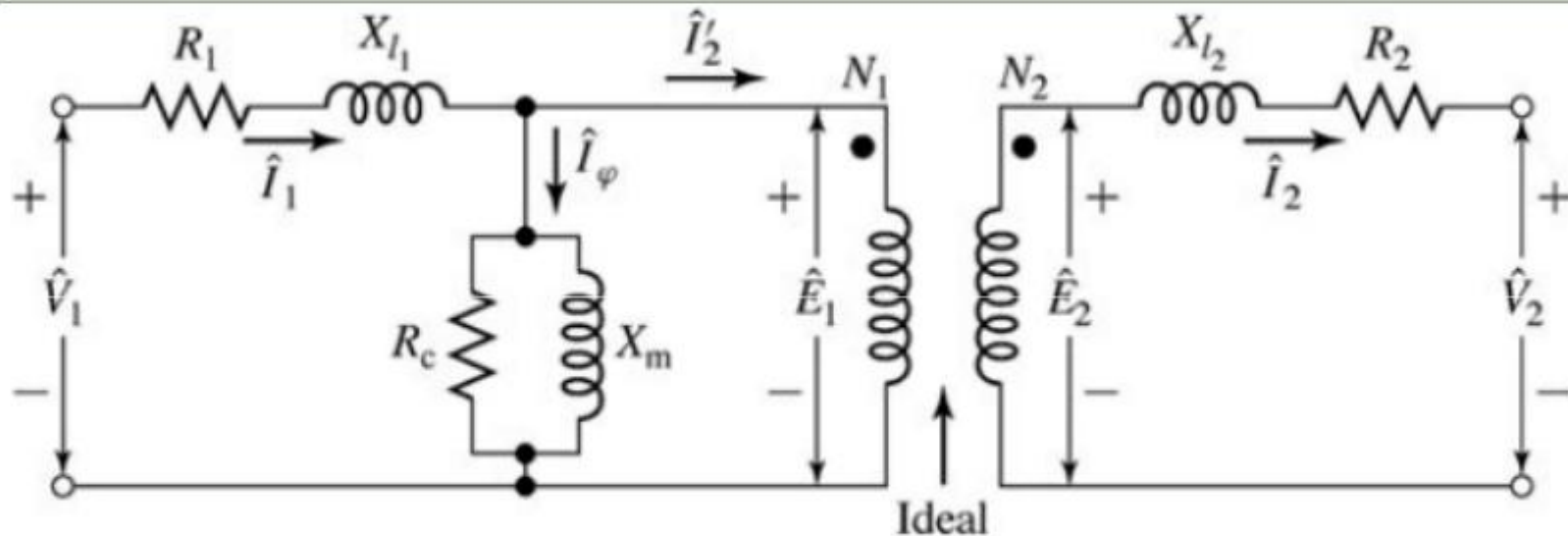
P_1 potencia no primário

P_{co} perdas no cobre

P_{fe} perdas no ferro

Transformador – Reatâncias e Circuito Equivalente

- Utiliza-se o seguinte circuito equivalente para um transformador:



r_1 – resistência do primário

X_{11} – reatância de dispersão do primário

r_2 – resistência do secundário

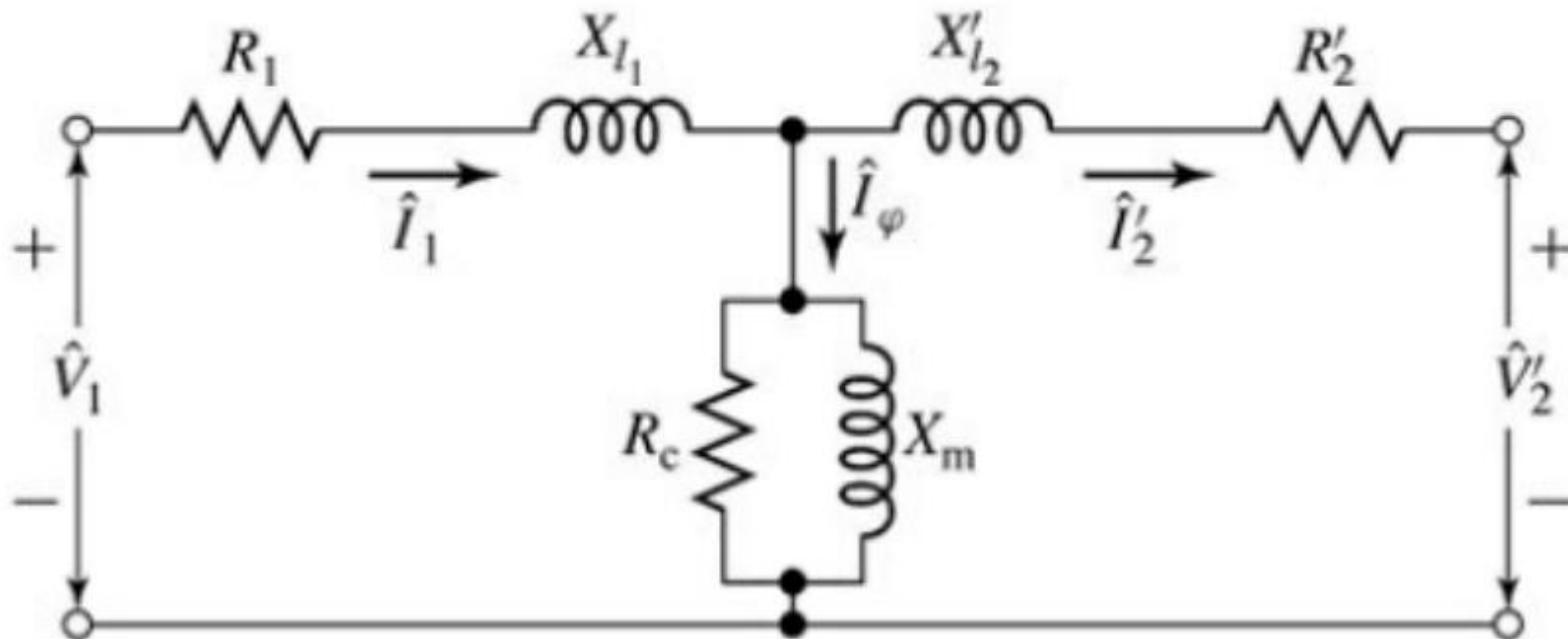
X_{12} – reatância de dispersão do secundário

r_c – resistência de perdas no ferro

X_m – reatância mútua

Transformador – Reatâncias e Circuito Equivalente

- Normalmente, elimina-se o transformador ideal, referindo as grandezas do secundário para o primário.



Transformador – Reatâncias e Circuito Equivalente

- Dado um determinado transformador, como obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente?

$$P_{co} = r_{eq} \cdot I_1^2$$

$$P_{fe} = \frac{V_1^2}{R_c}$$

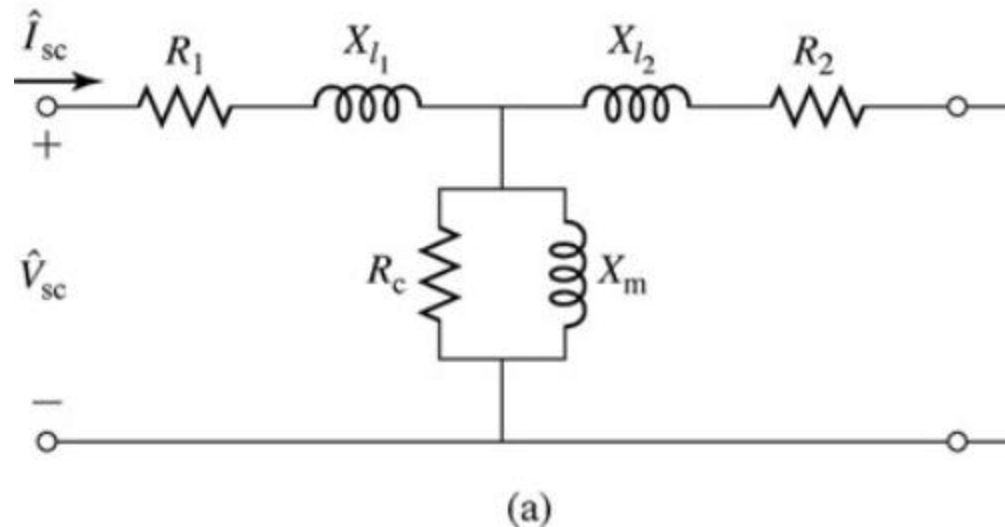
Ensaaios em Transformadores

Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito é usado para obter a impedância equivalente em série $R_{eq} + j X_{eq}$. O curto-circuito é aplicado ao secundário do transformador e a tensão reduzida, ao primário.

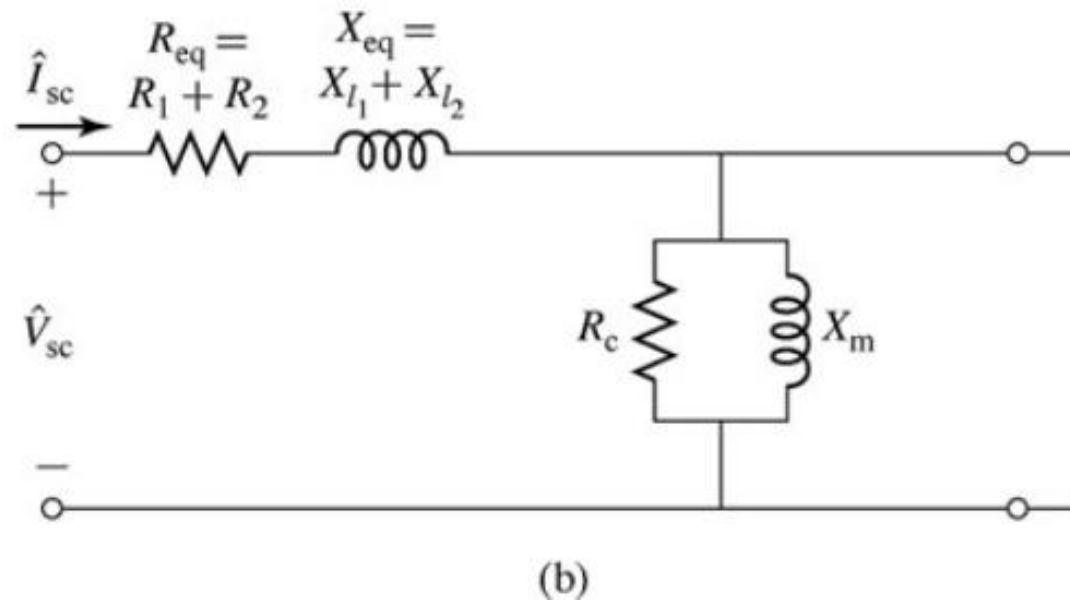
Ensaio em Transformadores

Circuito equivalente em T sob curto



Ensaio em Transformadores

Circuito equivalente em L sob curto



Ensaaios em Transformadores

As figuras anterior mostram a impedância do secundário do transformador referida ao lado do primário, e um curto-circuito aplicado ao secundário. São mostrados os circuitos T e L.

Ensaaios em Transformadores

A impedância de curto-circuito Z_{cc} , considerando o modelo T, é:

$$Z_{cc} = R_1 + jX_{l1} + \frac{Z_{\phi} (R_2 + jX_{l2})}{Z_{\phi} + R_2 + jX_{l2}}$$

Ensaaios em Transformadores

Como a impedância Z_{φ} do ramo de excitação é muito maior do que a impedância de dispersão do secundário, Z_{cc} pode ser dado por:

$$Z_{cc} \cong R_1 + jX_{l1} + R_2 + jX_{l2}$$

Ensaio em Transformadores

No ensaio de curto-circuito, mede-se a tensão aplicada V_{cc} , a corrente de curto I_{cc} e a potência P_{cc} .

$$|Z_{eq}| = |Z_{cc}| = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad R_{eq} = R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

$$X_{eq} = X_{cc} = \sqrt{|Z_{cc}|^2 - R_{cc}^2}$$

Ensaaios em Transformadores

Para se obter os parâmetros do circuito equivalente tipo T, pode-se considerar que:

$$R_1 = R_2 = 0,5 \cdot R_{eq}$$

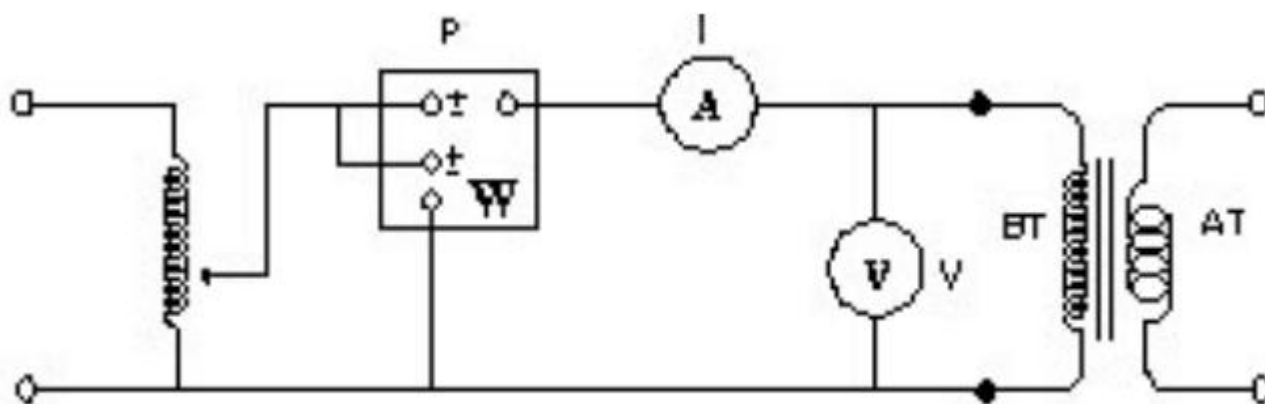
$$X_{l1} = X_{l2} = 0,5 \cdot X_{eq}$$

Ensaaios em Transformadores

O ensaio de circuito aberto, também chamado de ensaio a vazio, é realizado com o secundário em aberto e a tensão nominal aplicada ao primário. Assim, apenas a corrente de excitação irá circular.

Ensaio em Transformadores

Esquema elétrico do ensaio de circuito aberto ou a vazio.

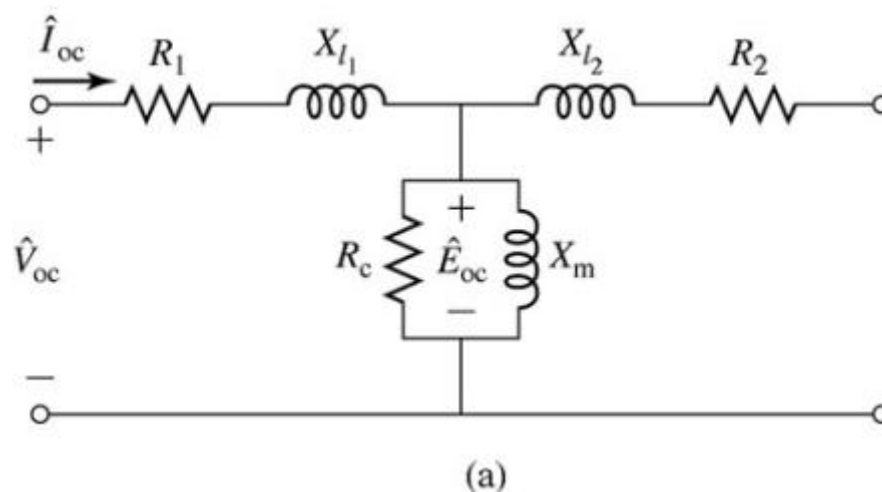


Ensaaios em Transformadores

Por conveniência, o lado de baixa tensão é alimentado no ensaio a vazio. Em geral, este enrolamento é o oposto ao usado no ensaio de curto-circuito. Então, deve-se referir as impedâncias obtidas a um mesmo lado.

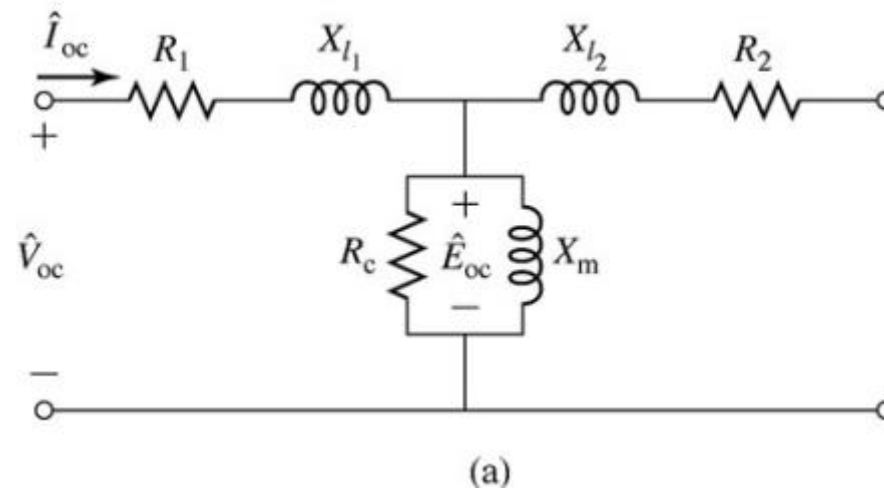
Ensaio em Transformadores

Circuito equivalente T. As letras "oc" significam open-circuited.



Ensaaios em Transformadores

Circuito equivalente T. As letras "oc" significam open-circuited.



Ensaaios em Transformadores

Como a impedância de excitação é bem elevada, a queda de tensão na impedância de dispersão do primário, causada pela corrente de excitação, é desprezível. Assim, a tensão aplicada é praticamente igual a tensão sobre o ramo de excitação.

Ensaaios em Transformadores

Também, a perda na resistência do enrolamento primário, causada pela corrente de excitação, é desprezível, de modo que a potência de entrada é considerada igual à perda no núcleo.

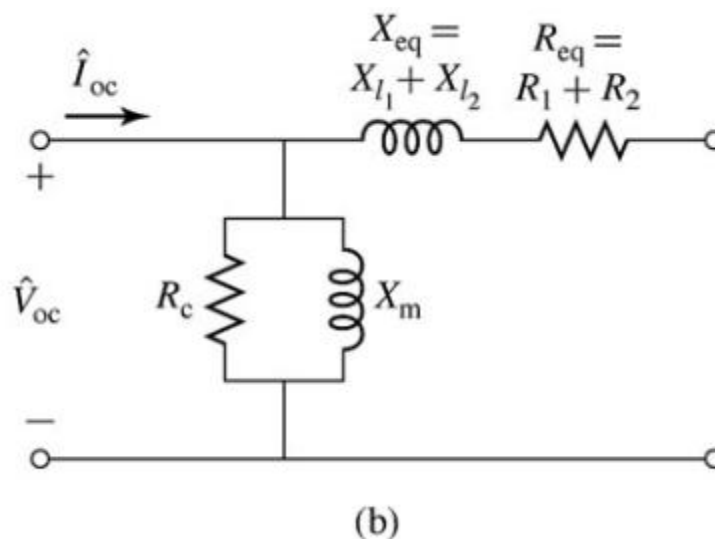
$$P_{fe} = P_{ca} = \frac{V_1^2}{R_c}$$

Ensaio em Transformadores

Então, costuma-se ignorar a impedância de dispersão no primário, e aproximar a impedância de circuito aberto como sendo a impedância de magnetização.

Ensaio em Transformadores

Circuito equivalente L. As letras "oc" significam open-circuited.



Ensaaios em Transformadores

No ensaio em vazio, mede-se a tensão aplicada V_{ca} , a corrente de circuito aberto I_{ca} e a potência P_{ca} . A tensão V_{ca} é a tensão nominal e a corrente I_{ca} é a corrente de excitação.

Ensaaios em Transformadores

Os parâmetros do circuito paralelo são obtidos usando as seguintes fórmulas:

$$R_c = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}} \quad Z_{ca} = \frac{V_{ca}}{I_{ca}}$$

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

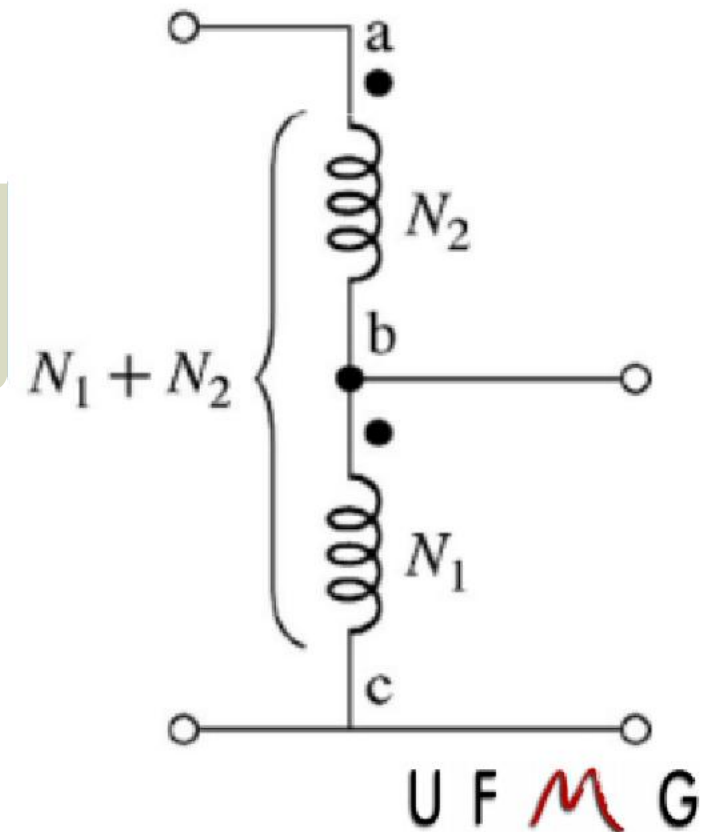
Auto-Transformador

- Transformador construído sem isolamento elétrico
- Custo mais baixo
- Menores indutâncias de dispersão

Auto-Transformador

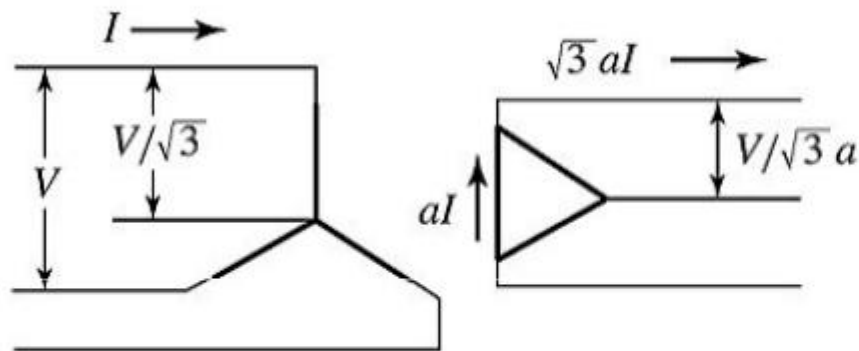
- A relação de Transformação é dada por:

$$\frac{N_1 + N_2}{N_1}$$

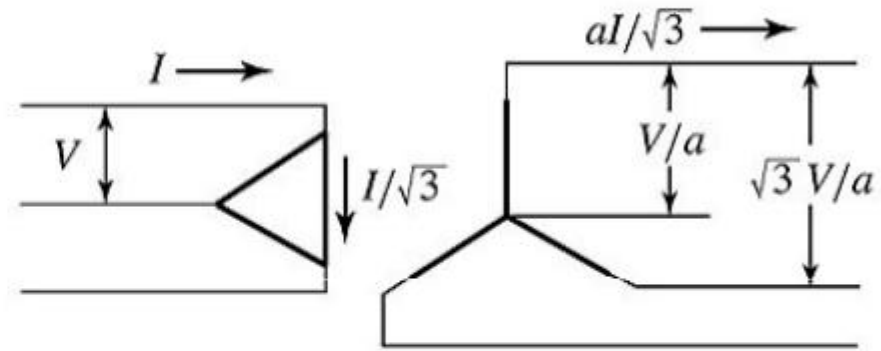


Transformadores em Circuitos Trifásicos

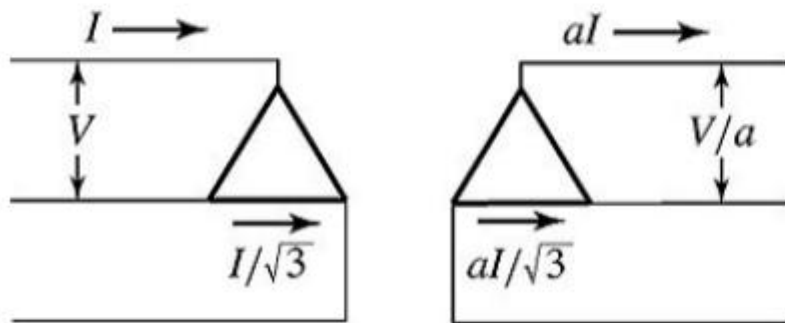
- Diversos tipos de ligação são possíveis, conforme ilustrado ($a = N_1 / N_2$):



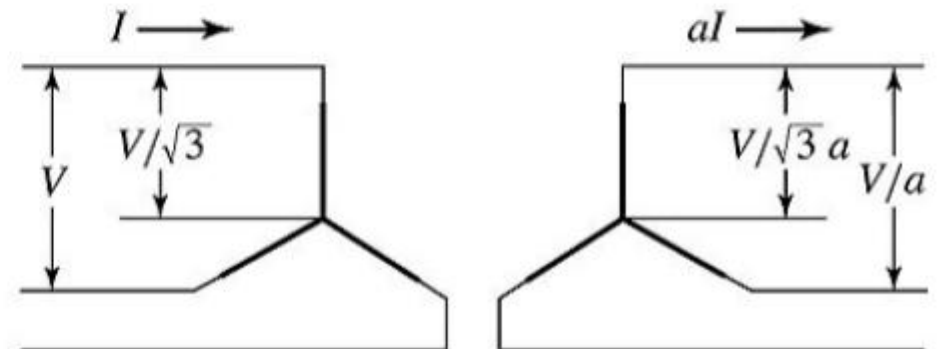
(a) Y- Δ connection



(b) Δ -Y connection



(c) Δ - Δ connection



(d) Y-Y connection