

Transformadores e Seus Usos

Transformadores monofásicos

- Motivações.
- Introdução.
- Transformador ideal.
- Transformador real.
- Circuito equivalente.
- Determinação dos parâmetros do circuito equivalente.
- Rendimento.

Motivações

- Por que precisamos estudar este tópico?
 - Os transformadores permitem a transmissão a grandes distâncias usando altos níveis de tensão e reduzindo as perdas elétricas dos sistemas.
 - Entender os aspectos básicos do campo magnético que estabelecem os fundamentos da operação dos transformadores.
 - Desenvolver circuitos equivalentes que representem o comportamento dos transformadores.

-Transformadores monofásicos



-Transformadores trifásicos

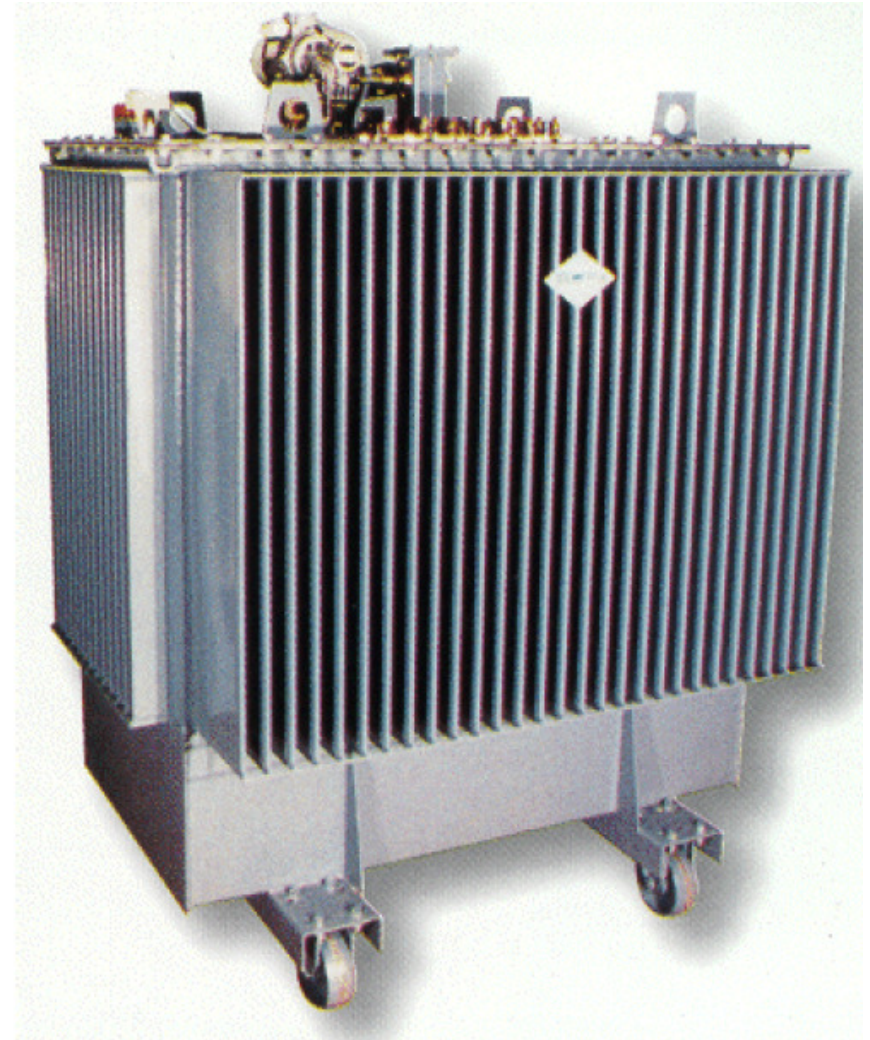


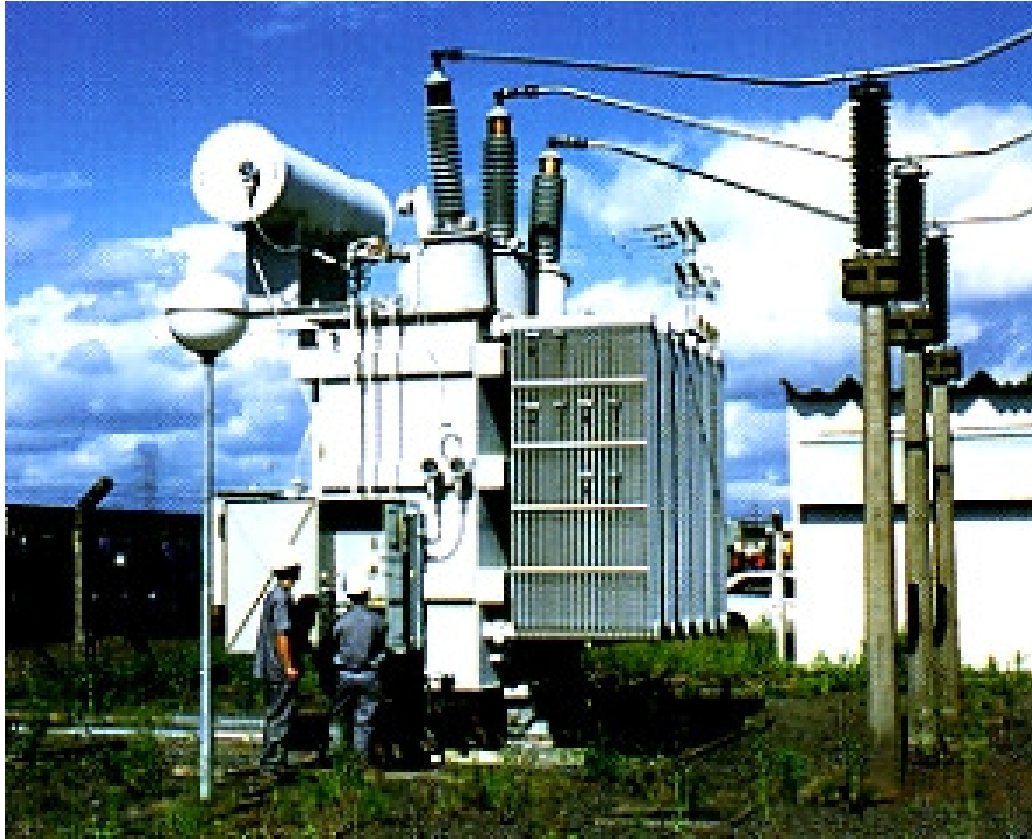
Fig. 22a/b: three-phase transformer 100 kVA (Ortea)

-Transformadores monofásico



-transformador utilizado em sistemas de distribuição

-Transformadores trifásico



-transformador utilizado em subestação de sistemas industriais

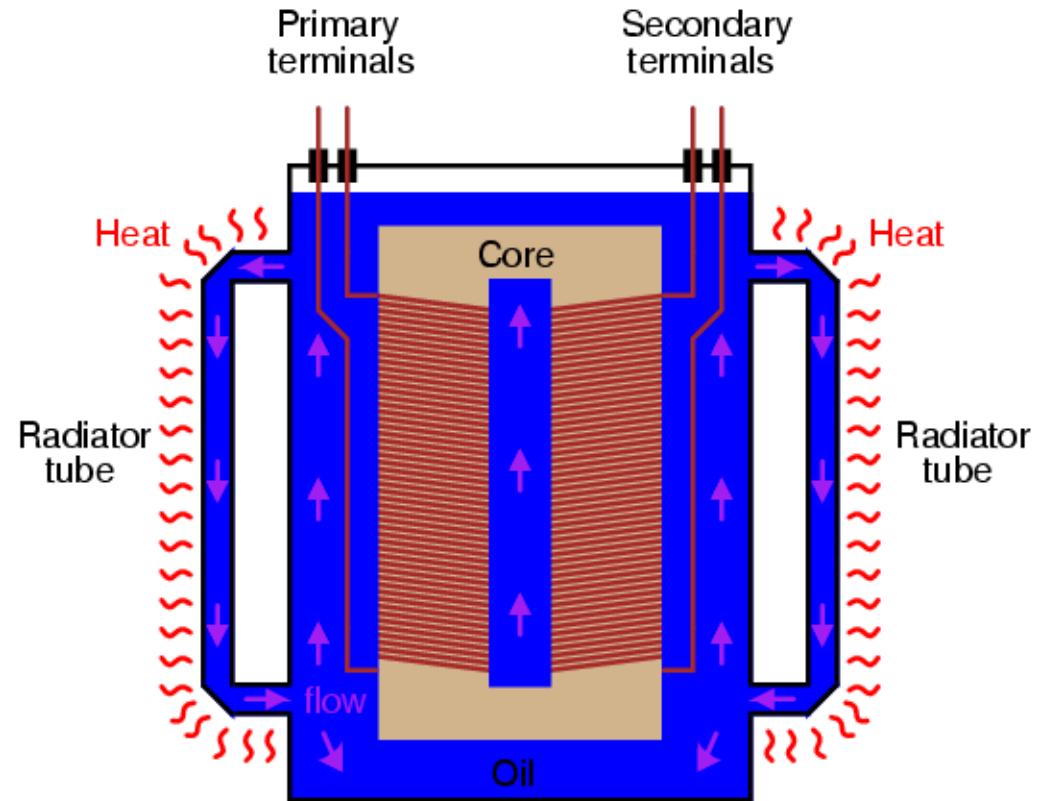
-Transformadores trifásico

-transformador utilizado em subestação de sistemas de distribuição
(cerca de 3,5 metros de altura)



-Transformadores trifásico

-Corte em um transformador
(bobinas, buchas, radiador)



-Transformadores trifásicos

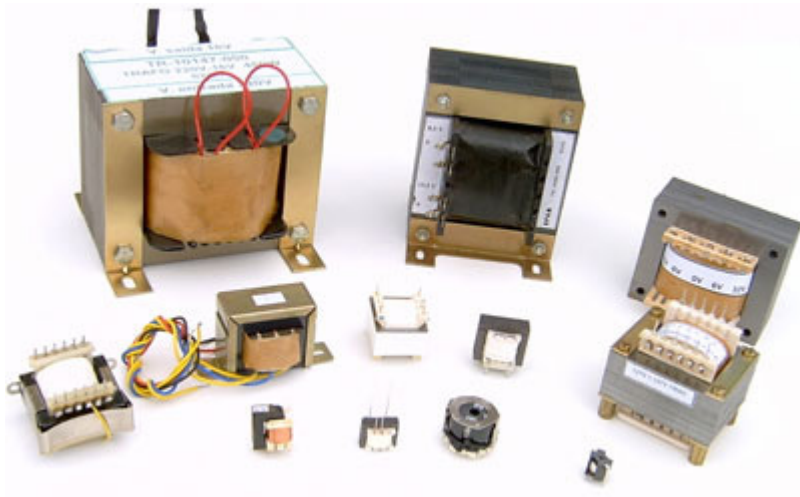


-Transformadores

-Transformador utilizado para realizar casamento de impedância em circuito impresso.



Fotos



Fotos

Transformador utilizado para realizar casamento de impedância em circuito impresso.



Fotos

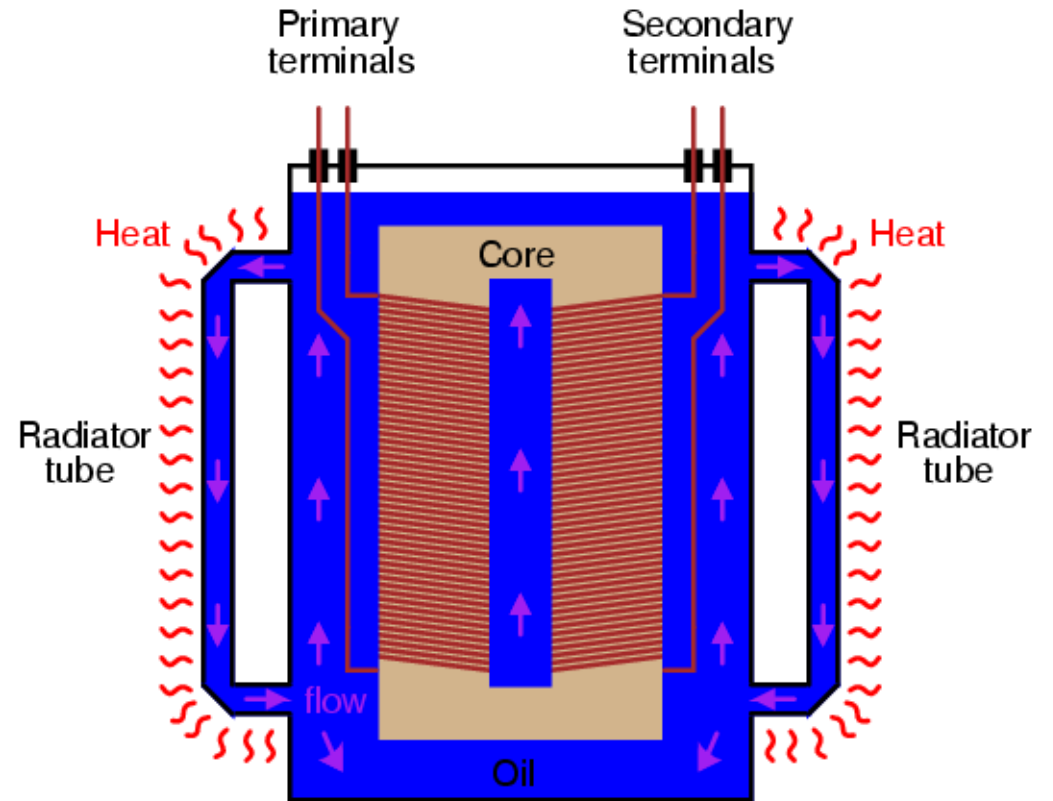


Transformador utilizado em sistemas de distribuição (alimentação da rede secundária)

Fotos



Corte em um transformador
(bobinas, buchas, radiador)

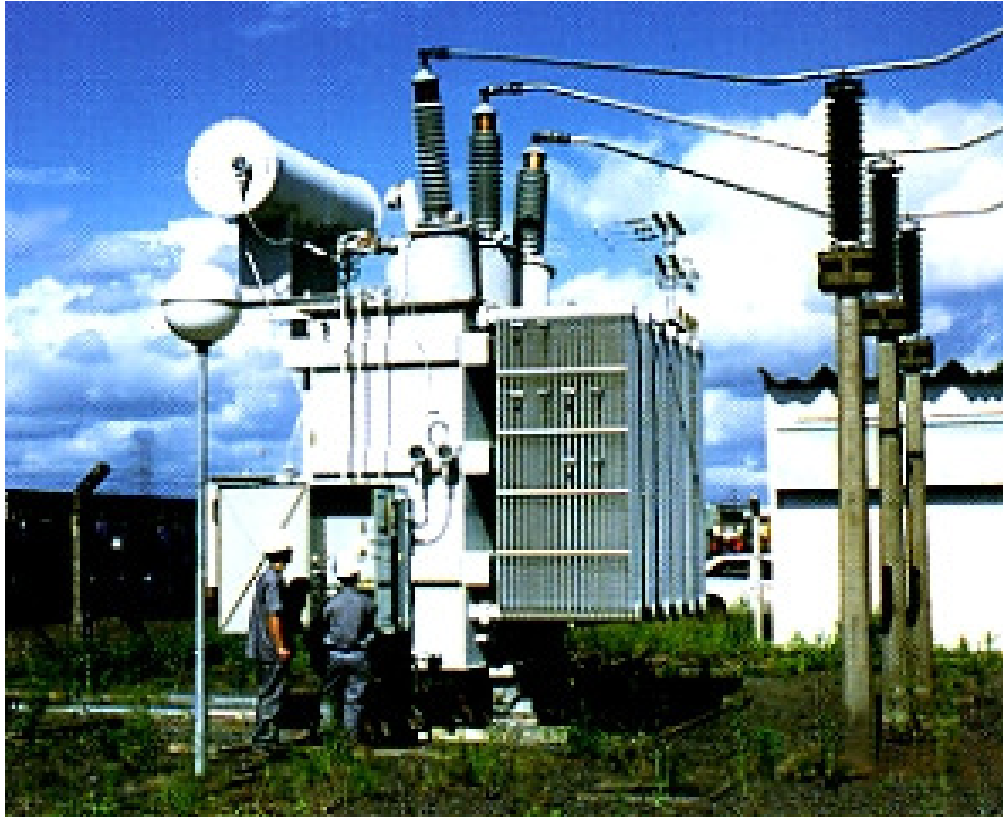


Fotos

Transformador utilizado em subestação de sistemas de distribuição
(cerca de 3,5 metros de altura)



Fotos



Transformador utilizado em subestação de sistemas industriais

Fotos



Transformador
utilizado em
sistemas de
transmissão

Fotos



Transformadores utilizado em sistemas de transmissão

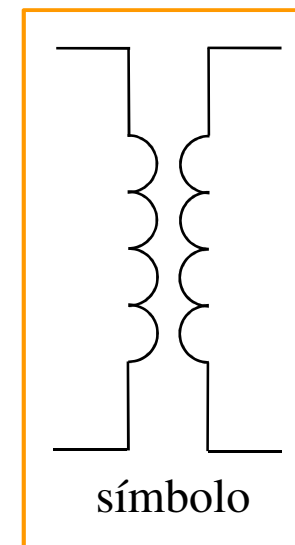
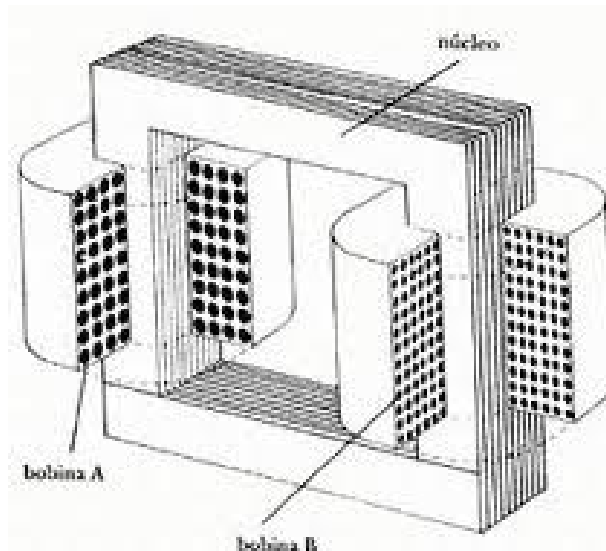
Introdução (1/6)

- O transformador é comumente utilizado em sistemas de conversão de energia e em sistemas elétricos.
- Seu princípio de funcionamento é baseado nas leis desenvolvidas para análise de circuitos magnéticos.
- Transformadores são utilizados para transferir energia elétrica entre diferentes circuitos elétricos através de um campo magnético, usualmente com diferentes níveis de tensão.

Introdução (2/6)

- As principais aplicações dos transformadores são:
 - Adequar os níveis de tensão em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.
 - Isolar eletricamente sistemas de controle e eletrônicos do circuito de potência principal (toda a energia é transferida somente através do campo magnético).
 - Realizar casamento de impedância de forma a maximizar a transferência de potência.
 - Evitar que a corrente contínua de um circuito elétrico seja transferida para o outro circuito elétrico.
 - Realizar medidas de tensão e corrente. Um transformador pode fornecer isolamento entre linhas de distribuição e dispositivos de medição.

Introdução (5/6)



- O transformador tem a função de transformar energia elétrica em c.a. de um determinado nível de tensão para um outro nível de tensão através da ação de um campo magnético.
- Esse dispositivo consiste de duas ou mais bobinas enroladas em um núcleo ferromagnético.
- Normalmente, a única conexão entre essas bobinas é o fluxo magnético que circula pelo núcleo ferromagnético (com exceção do autotransformador).

Exemplo da necessidade do uso de transformadores em sistemas de potência

Seja um gerador com tensão terminal de 10 kV e capacidade de 300 MW, e que se deseja transmitir esta potência (energia) para um carga situada a um distância de 20 km.

Tem-se que:

$$I_f = P_f / V_f \quad \text{A}$$

Sabemos que: $P_f = 300,0 \text{ MW}$

$$V_f = 10,0 \text{ kV}$$

Assim, temos:

$$I_f = 300,0/10,0 = 30,0 \text{ kA}$$

Exemplo da necessidade do uso de transformadores em sistemas de potência

- Sendo a resistividade do cobre $\rho = 1,75 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m}$, a resistência será:

$$R_L = \rho l/A \quad \Omega$$

- Para $l = 20 \text{ km}$ e considerando que o condutor tem uma bitola de 25 mm^2 , temos:

$$R_L = (1,75 \times 10^{-8} \times 20 \times 10^3) / (\pi(25 \times 10^{-3})^2) = 0,1783 \text{ } \Omega$$

- Assim, a perda ôhmica de potência (dissipada na LT) será:

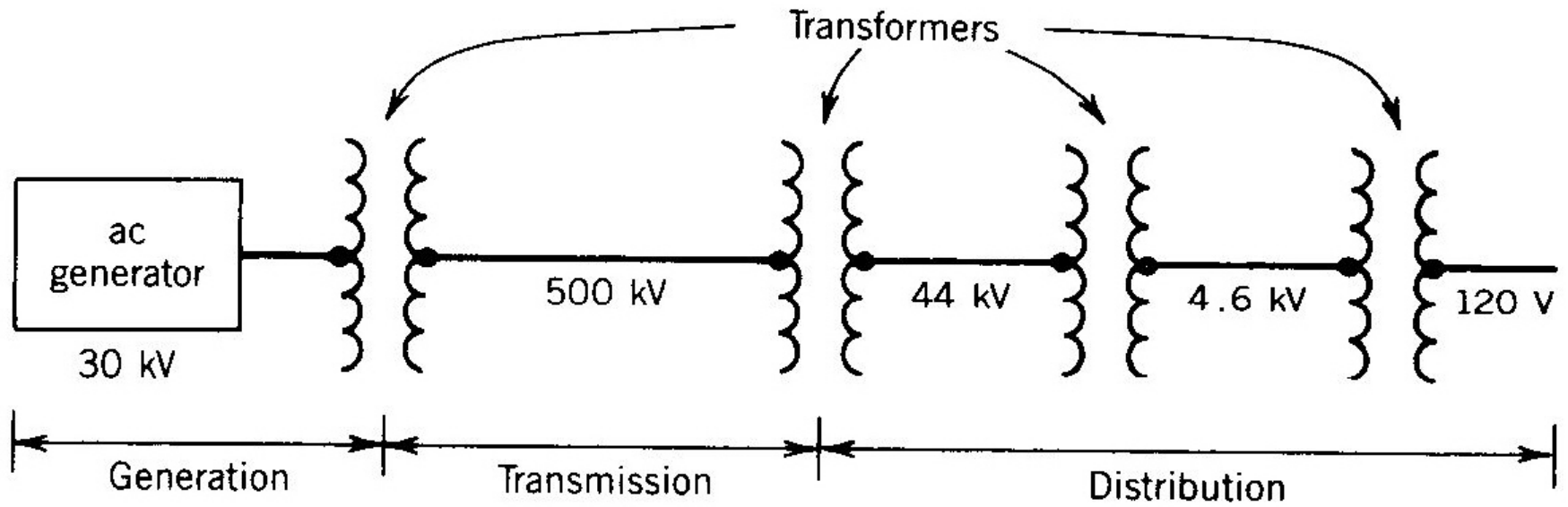
$$P_{loss} = R_L I^2 = 0,1783 \times (30,0)^2 = 160 \text{ MW}$$

- Esta perda representa:

$$(160/300,0) \times 100 = \mathbf{53,3\%}$$

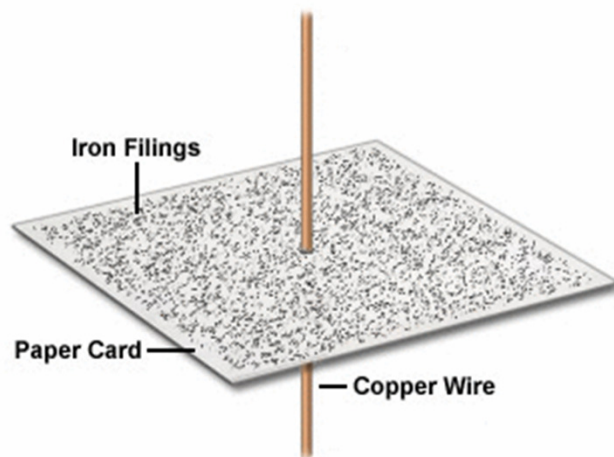
Ou seja, mais da metade da potência (energia) gerada seria perdida na transmissão.

Uso de transformadores em sistemas de potência



Revisão (1/6)

- Produção de um campo magnético.



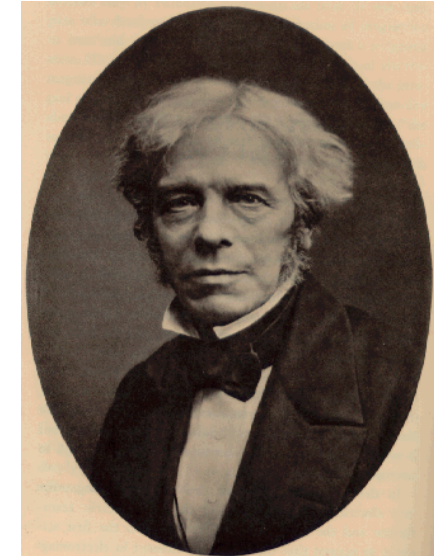
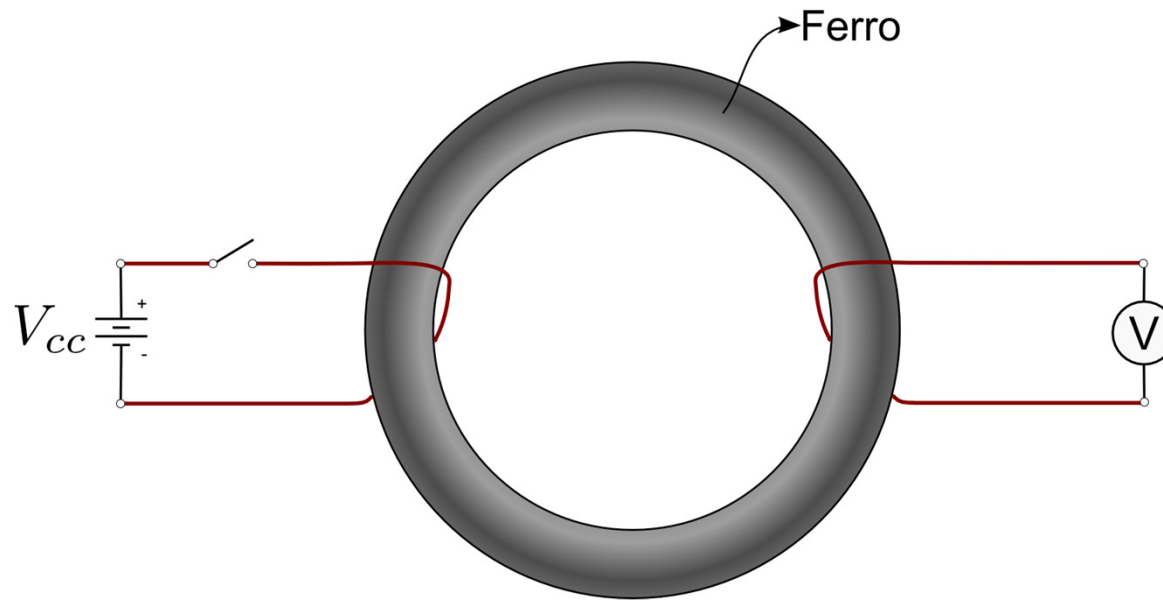
André-Marie Ampère

“Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica surge em torno dele um campo magnético”

- Lei circuital de Ampère.

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^n i_k$$

Revisão (2/6)



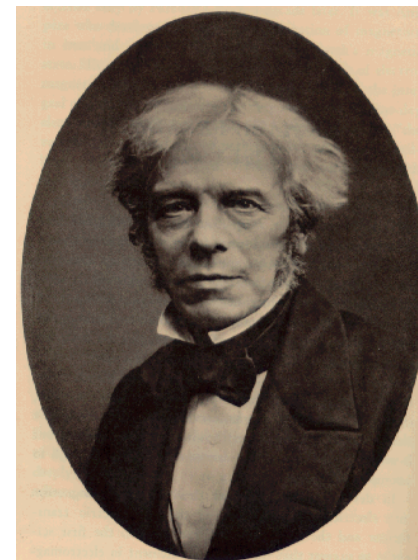
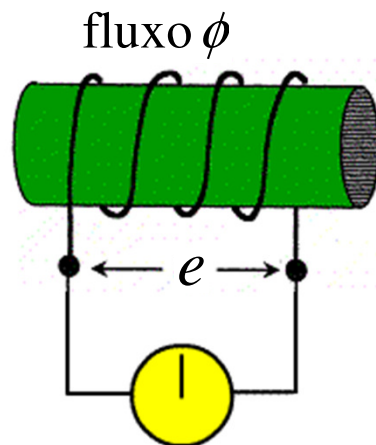
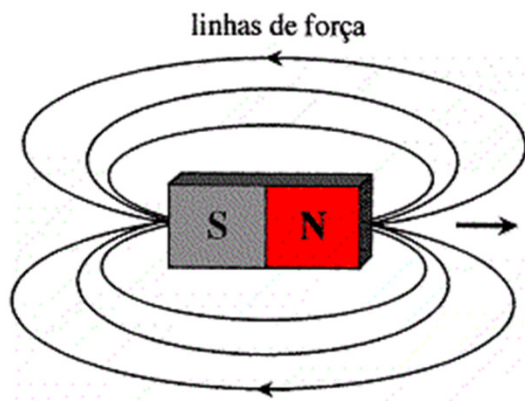
Michael Faraday

Constatações:

- Ocorre um deslocamento do ponteiro do galvanômetro no instante em que a chave é fechada ou aberta (fonte CC).
- Para corrente constante (chave fechada), independentemente de quão elevado seja o valor da tensão aplicada, não há deslocamento do ponteiro.

Revisão (3/6)

■ Lei de Faraday.



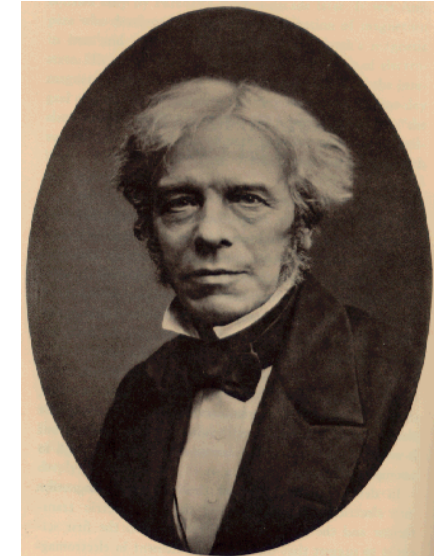
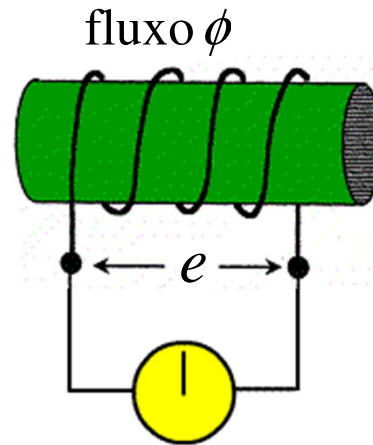
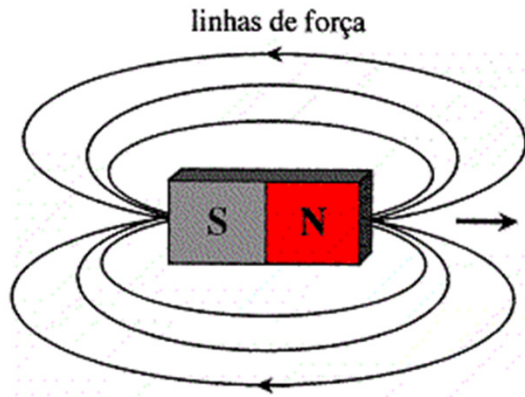
Michael Faraday

Constatações:

- Ao se aproximar ou afastar o ímã do solenóide (bobina) ocorre um deslocamento do ponteiro do galvanômetro.
- Quando o ímã está parado, independentemente de quão próximo este esteja do solenóide, não há deslocamento do ponteiro do galvanômetro.

Revisão (4/6)

■ Lei de Faraday.



Michael Faraday

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

■ A lei de Faraday declara que:

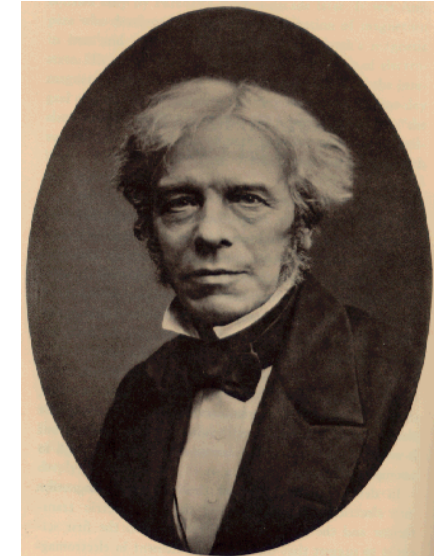
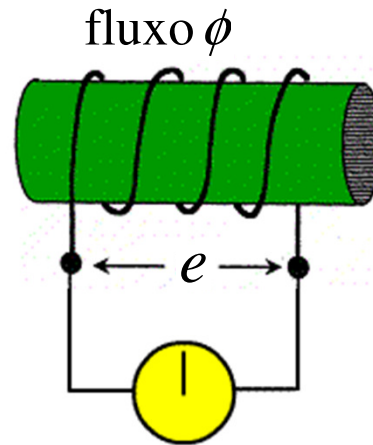
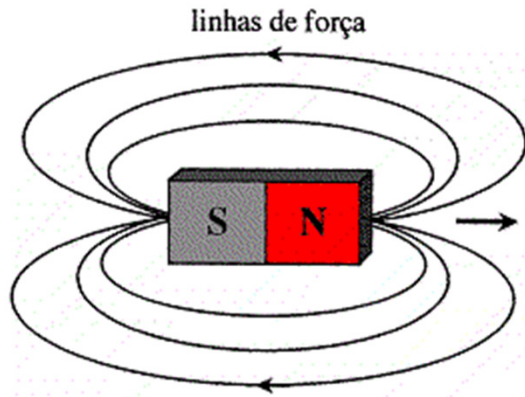
“Quando um circuito elétrico é atravessado por um fluxo magnético variável, surge uma fem (tensão) induzida atuando sobre o mesmo.”

■ A lei de Faraday também declara que:

“A fem (tensão) induzida no circuito é numericamente igual à variação do fluxo que o atravessa.”

Revisão (5/6)

■ Lei de Faraday.



Michael Faraday

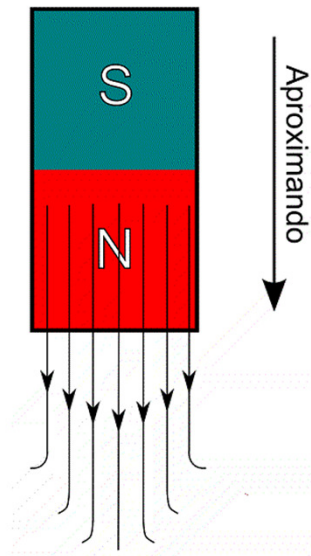
$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

Formas de se obter uma tensão induzida segundo a lei de Faraday:

- Provocar um movimento relativo entre o campo magnético e o circuito.
- Utilizar uma corrente variável para produzir um campo magnético variável.

Revisão (6/6)

■ Lei de Lenz.



$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

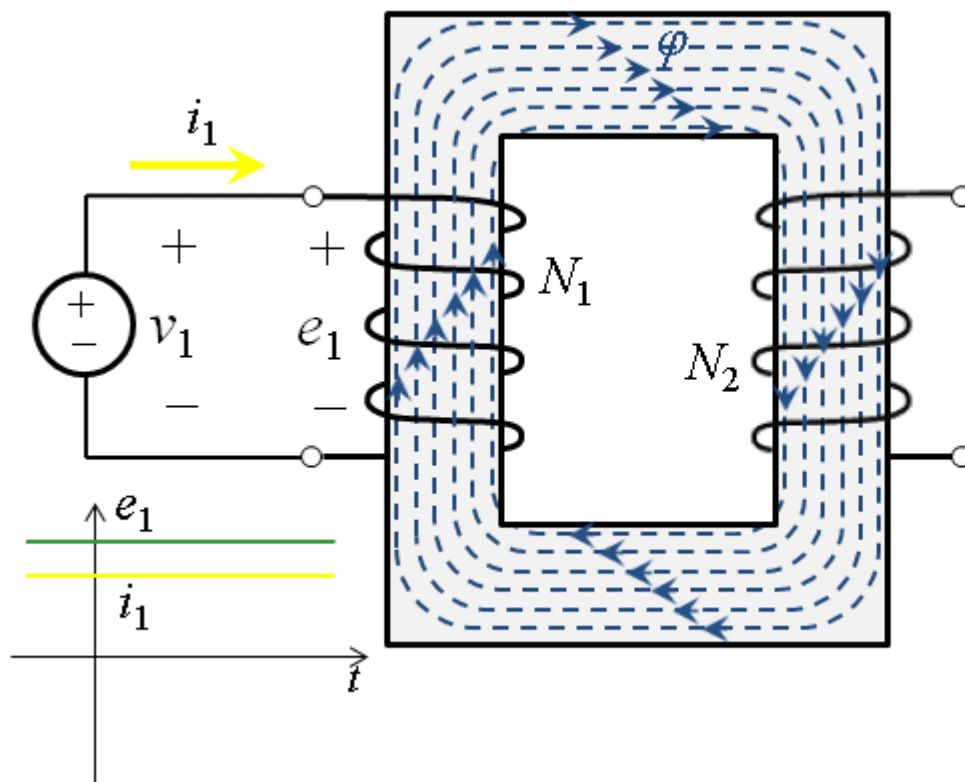


Heinrich Lenz



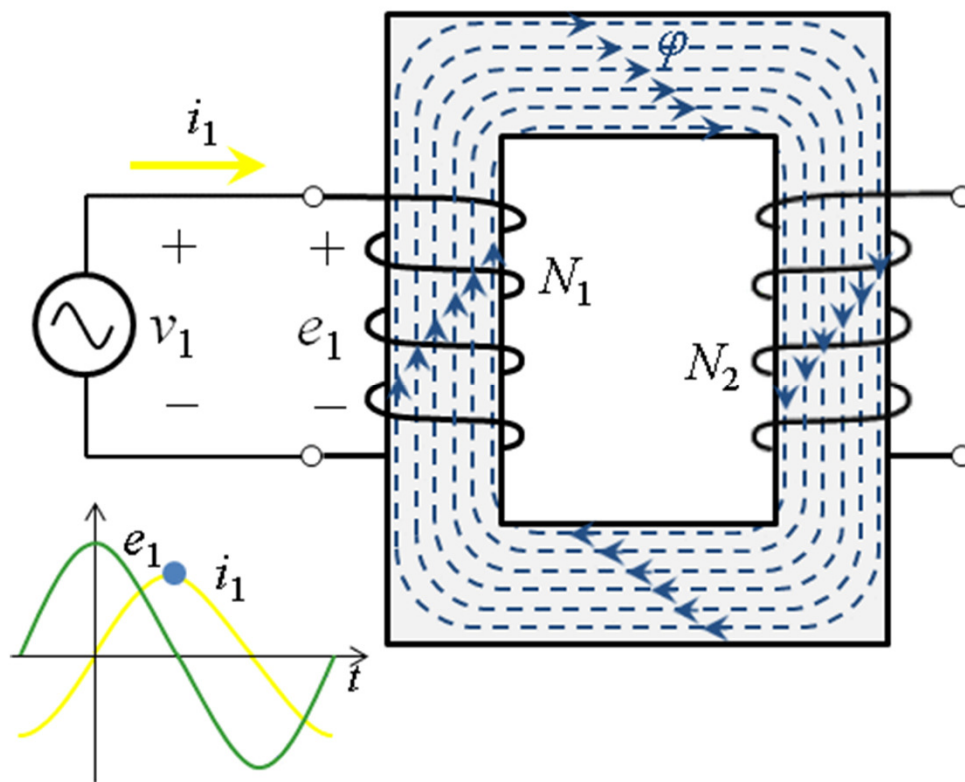
“A tensão induzida em um circuito fechado por um fluxo magnético variável produzirá uma corrente de forma a se opor á variação do fluxo que a criou”

Princípio de funcionamento (1/4)



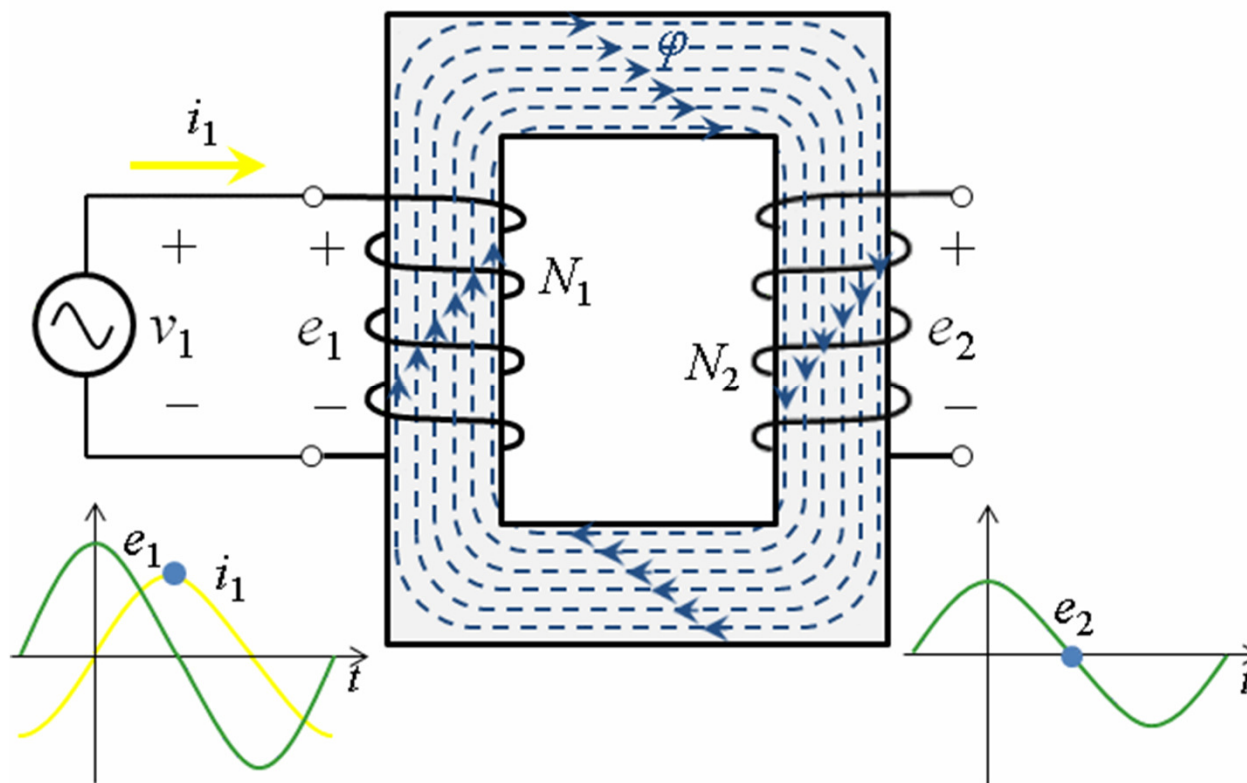
- O que acontece se energizamos a bobina 1 com uma fonte de corrente contínua?
- O que observa a bobina 2?

Princípio de funcionamento (2/4)



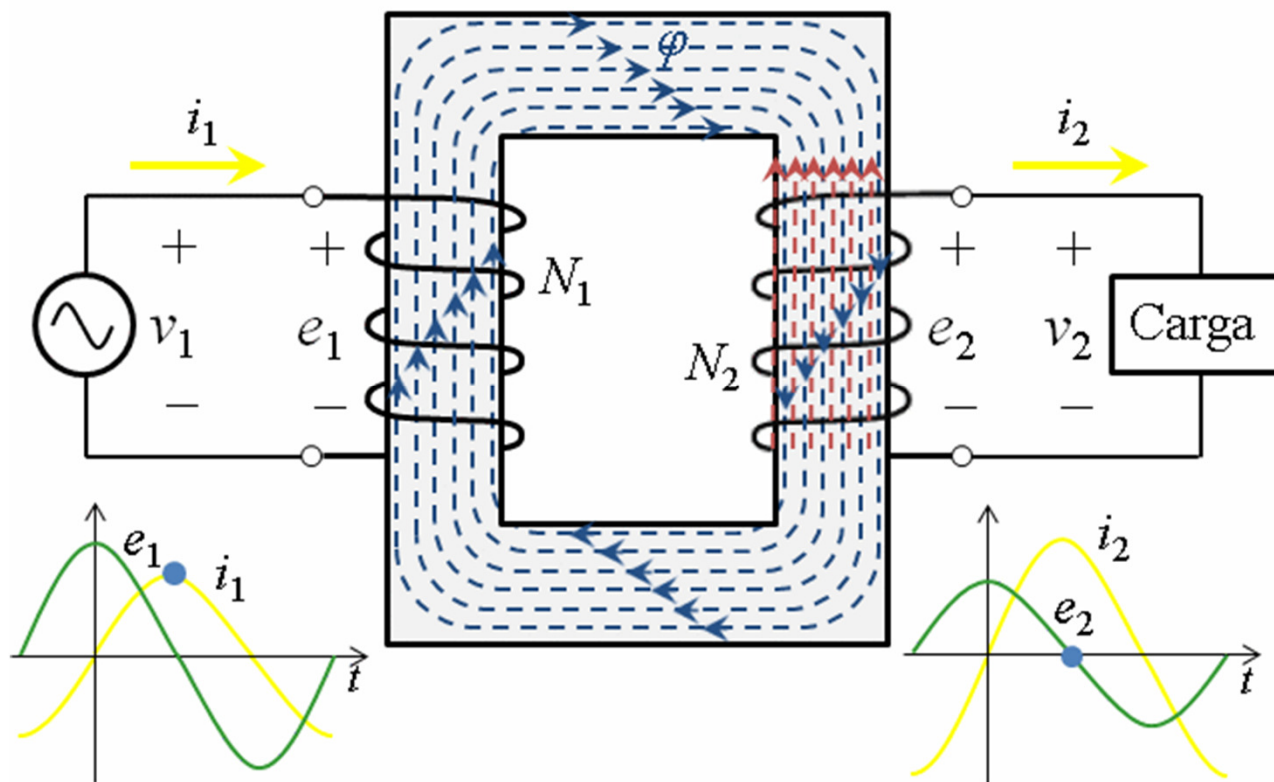
- O que acontece se energizamos a bobina 1 do transformador com uma fonte de corrente alternada?
- O que observa a bobina 2 do transformador?

Princípio de funcionamento (3/4)



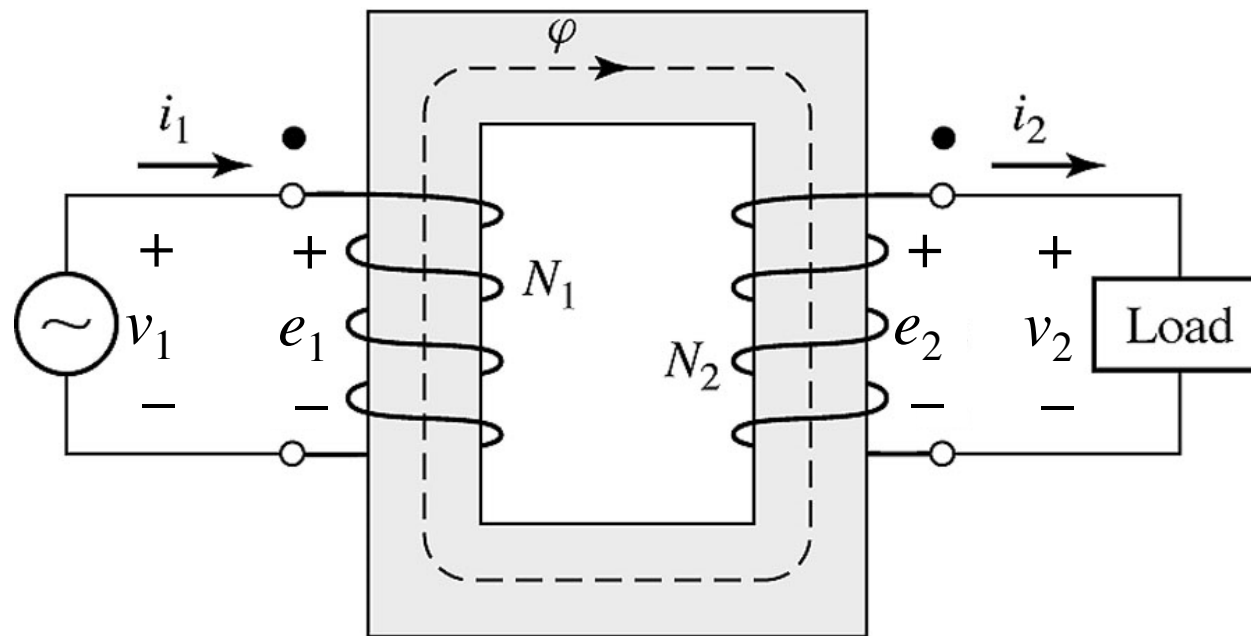
- Pela lei de indução de Faraday, surge uma tensão induzida na bobina 2 do transformador.

Princípio de funcionamento (4/4)



- Se uma carga é conectada na bobina 2 do transformador, uma corrente i_2 circulará pelo mesmo.
- Pela lei de Lenz, o sentido da corrente i_2 é de forma a se opor à variação do fluxo magnético que a criou.

Transformador ideal



- Transformador ideal (sem perdas):
 - A resistência dos enrolamentos são desprezíveis
 - A permeabilidade do núcleo é infinita (portanto a corrente de magnetização é nula)
 - Não há dispersão
 - Não há perdas no núcleo

Equação fundamental do transformador

■ Equação fundamental do transformador

$$\begin{cases} v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{cases}$$

■ Em valor eficaz temos:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \rightarrow \quad E_1 = 4,444 \cdot N_1 \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad \rightarrow \quad E_2 = 4,444 \cdot N_2 \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

$$E = 4,444 \cdot N \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

Relação de transformação

- Considerando o transformador ideal em vazio ($i_2 = 0$)

$$\begin{cases} v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \\ v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \end{cases}$$

- Desta forma temos:

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

Em que, a é relação de espiras do transformador, denominada relação de transformação.

Primeira equação do transformador

- Tal relação é denominada relação de transformação.
- Para tensões senoidais, em termos de fasores, temos a primeira eq. do transformador

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Portanto:

$$\dot{V}_1 = a\dot{V}_2$$

$a < 1 \quad \Rightarrow \quad |\dot{V}_2| > |\dot{V}_1| \quad \Rightarrow \quad \text{transformador elevador}$

$a > 1 \quad \Rightarrow \quad |\dot{V}_2| < |\dot{V}_1| \quad \Rightarrow \quad \text{transformador abaixador}$



Transformador - Princípio de Funcionamento

<http://www.youtube.com/watch?v=CUIIT-wEEExU>

Segunda equação do transformador

- Considerando uma carga no secundário, existirá uma corrente i_2 no mesmo que cria uma força magneto – motriz $N_2 i_2$ que tende a alterar o fluxo no núcleo (desmagnetizando o núcleo).
- Portanto, o equilíbrio entre as forças magneto – motrizes será perturbado.
- A segunda equação do circuito magnético de um transformador é dada por:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2$$

Segunda equação do transformador

- Visto que $N_1 i_1 = N_2 i_2$, a única maneira do balanço se manter, é a corrente i_1 variar com o aumento de i_2 . Pode-se dizer que uma *fmm* adicional é exigida do primário. Assim, temos:

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

- Em termos fasoriais:

$$\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_2}{a}$$

- Obs: na análise acima, desprezamos a corrente de magnetização (permeabilidade infinita), mas na prática é necessário uma pequena corrente de magnetização no enrolamento primário para estabelecer o fluxo no núcleo.

Balço de potências

- A potência instantânea no primário é dada por:

$$p_1(t) = v_1 \cdot i_1$$

- A potência instantânea no secundário é dada por:

$$p_2(t) = v_2 \cdot i_2$$

- Sabemos:

$$p_1(t) = v_1 \cdot i_1 = av_2 \cdot \frac{i_2}{a} = v_2 \cdot i_2 = p_2(t)$$

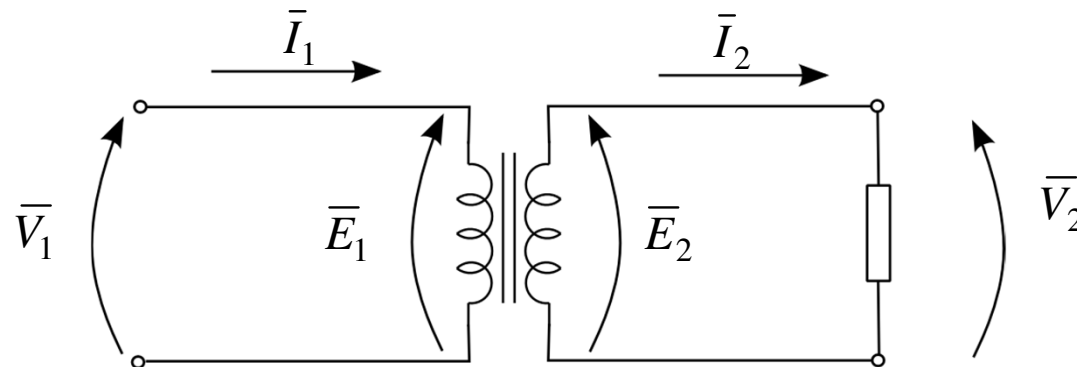
- O que era esperado, visto que todas as perdas foram desprezadas. Em termos fasoriais, temos:

$$S_1 = \dot{V}_1 \cdot \dot{I}_1^* = a\dot{V}_2 \cdot \frac{\dot{I}_2^*}{a} = \dot{V}_2 \cdot \dot{I}_2^* = S_2$$

Em que S é a potência aparente (VA).

Valores referidos

- Ao se conectar uma impedância no secundário, qual a impedância vista pelo primário?



- Temos que a impedância nos terminais do secundário é dada por:

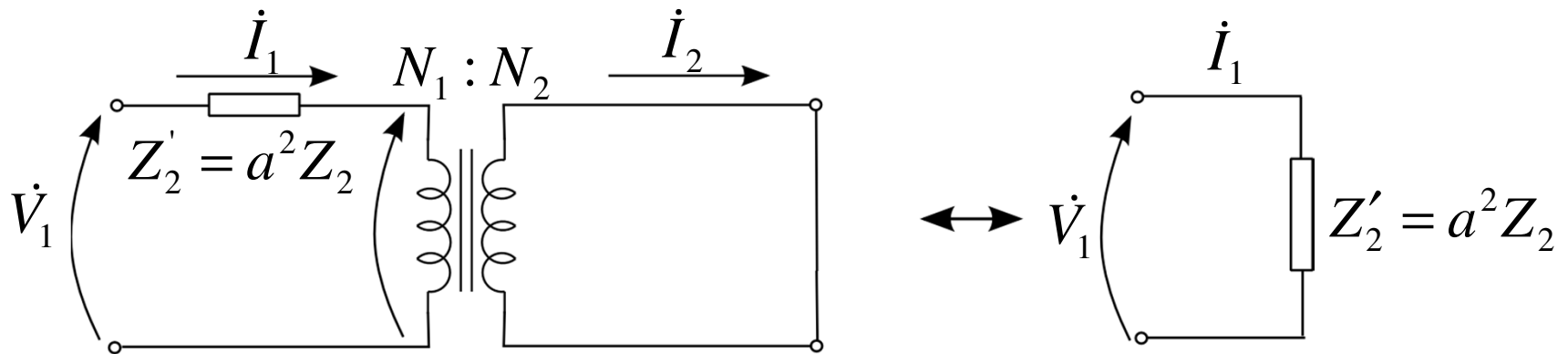
$$Z_2 = \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2}$$

- Analogamente, a impedância equivalente vista dos terminais do primário (vista pela fonte) é:

$$Z_1 = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \frac{a\dot{V}_2}{\dot{I}_2/a} = a^2 \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2} = a^2 Z_2 = Z'_2$$

Valores referidos

- A impedância conectada ao terminal do secundário produz no primário o mesmo efeito que o produzido por uma impedância equivalente Z'_2 conectada aos terminais do primário. Z'_2 é chamada de impedância do secundário refletida ao primário.

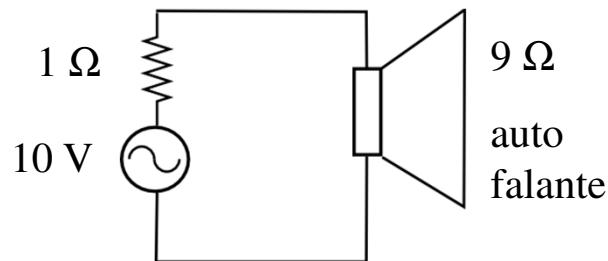


- De maneira similar, as correntes e tensões podem ser refletidas de um lado para o outro através da relação de espiras:

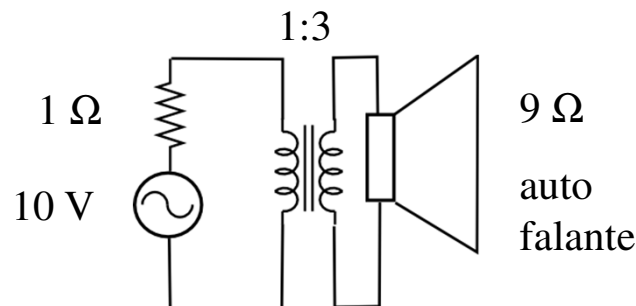
$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_2}{a} \\ \dot{V}_1 = \frac{N_1}{N_2} \dot{V}_2 = a \dot{V}_2 \end{cases}$$

Exemplo: Casamento de impedância via transformador

Um auto falante tem uma impedância resistiva de $9\ \Omega$, o qual é conectado a uma fonte de $10\ \text{V}$ com impedância resistiva interna de $1\ \Omega$, como mostrado na figura abaixo:



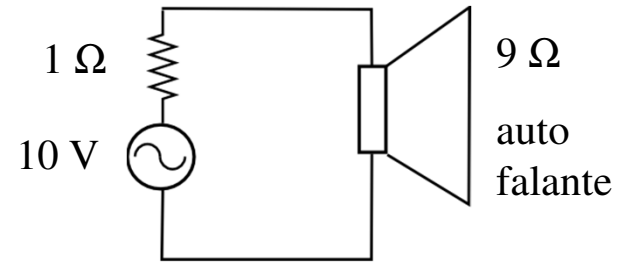
- (a) Determine a potência entregue pela fonte ao auto falante.
- (b) Para maximizar a transferência de potência para o auto falante, um transformador com uma relação de espira de 1:3 é usado para conectá-lo a fonte como mostrado na figura abaixo. Determine a potência entregue pela fonte ao auto falante neste caso.



Exemplo: Casamento de impedância via transformador

(a) $I = V/R_T = 10/(1+9) = 1 \text{ A}$

$$P = R I^2 = 9 \times 1^2 = 9 \text{ W}$$



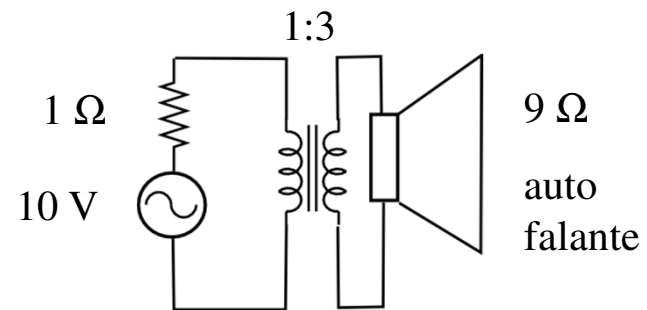
(b) A impedância refletida ao primário é dada por:

$$R'_2 = a^2 \cdot R_2 = (1/3)^2 \times 9 = 1 \Omega$$

Portanto, temos:

$$I = V/R_T = 10/(1+1) = 5 \text{ A}$$

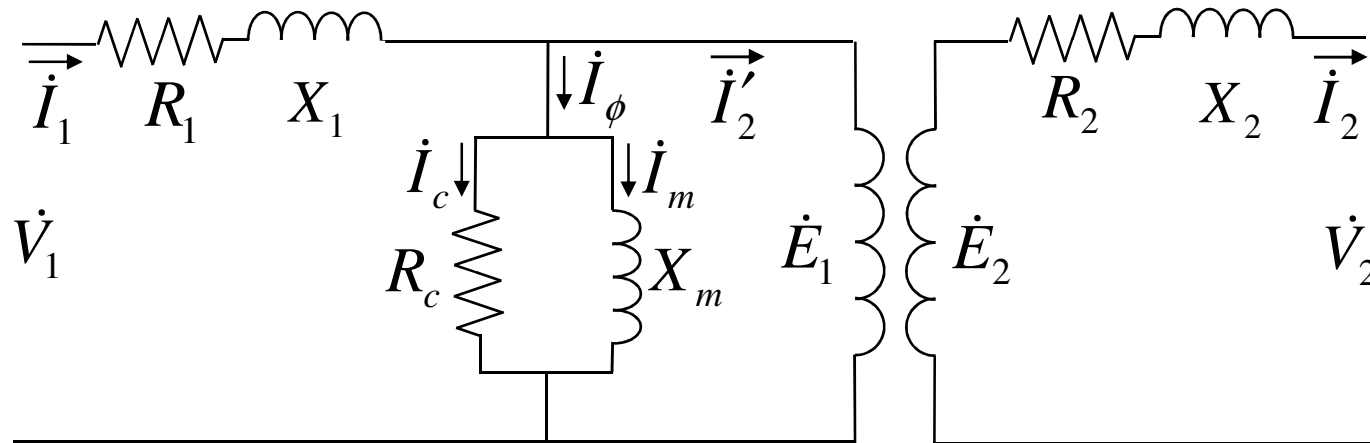
$$P = R I^2 = 1 \times 5^2 = 25 \text{ W}$$



Transformador real (1/2)

- Um transformador ideal não apresenta perdas e toda potência aplicada ao primário é entregue a carga. Algumas perdas são:
 - Potência dissipada nos enrolamentos.
 - Perdas por aquecimento do núcleo do transformador (por correntes parasitas e histerese).
 - Fluxo de dispersão (i.e., parte do fluxo deixa o núcleo e não concatena o primário com o secundário).
- No transformador real:
 - As resistências dos enrolamentos não são desprezíveis.
 - A permeabilidade do núcleo é finita (haverá uma corrente de magnetização não nula e a relutância do núcleo é diferente de zero).
 - Há dispersão.
 - Há perdas no núcleo (por correntes parasitas, histerese, ruído, magneto estricção...).

Transformador real (2/2)



- R_1 → resistência do enrolamento do primário.
- R_2 → resistência do enrolamento do secundário.
- X_1 → reatância de dispersão do primário.
- X_2 → reatância de dispersão do secundário.
- R_c → representa as perdas no núcleo.
- X_m → reatância de magnetização (produz o fluxo).
- I_ϕ → corrente de excitação

Circuito equivalente (1/8)

- Definindo-se:

$$Z_1 = R_1 + jX_{l1} \quad \rightarrow \quad \text{impedância interna do primário}$$

$$Z_2 = R_2 + jX_{l2} \quad \rightarrow \quad \text{impedância interna do secundário}$$

- Tem-se:

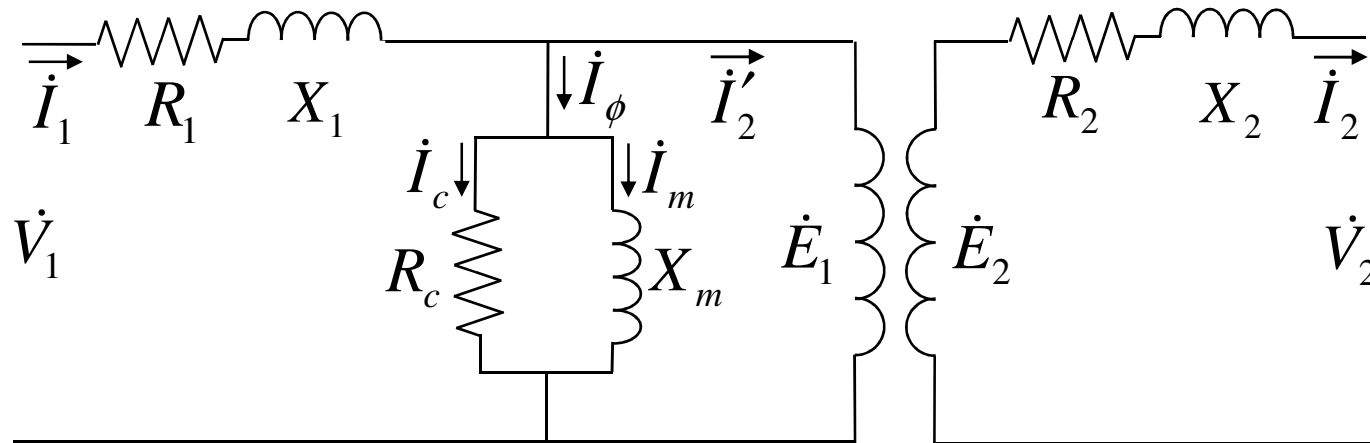
$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{V}_1 - Z_1 \dot{I}_1 \\ \dot{E}_2 = \dot{V}_2 + Z_2 \dot{I}_2 \end{cases}$$

- Portanto:

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

- A relação de espiras é igual a relação entre as tensões induzidas pelo fluxo mútuo nos enrolamentos primário e secundário.

Circuito equivalente (3/8)



■ Em que:

$$R_c = \frac{\dot{E}_1^2}{P_c} : \text{representa as perdas no núcleo}$$

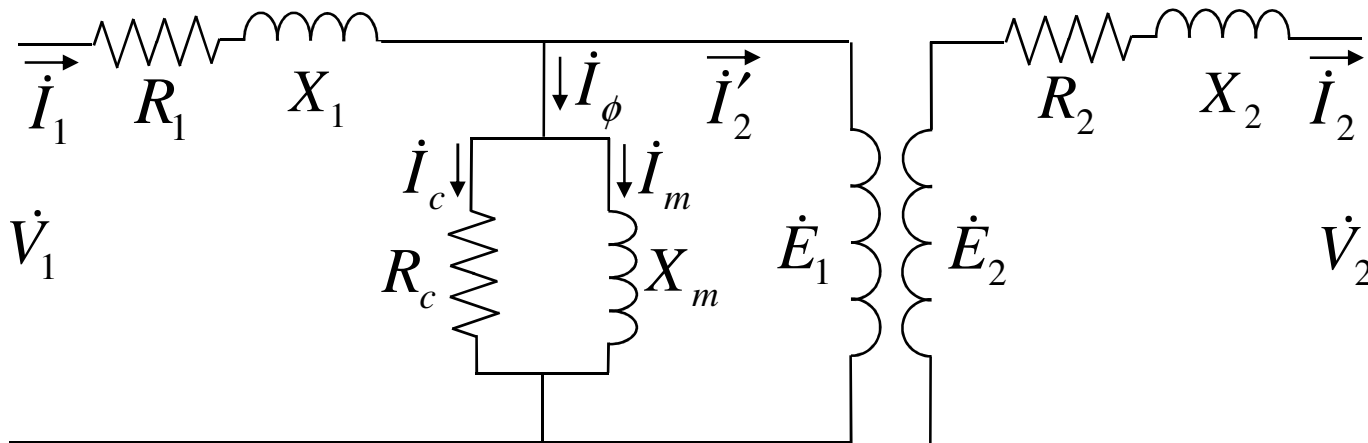
$$X_m = \frac{\dot{E}_1^2}{Q_m} : \text{reatância de magnetização (produz o fluxo)}$$

P_c : perdas no núcleo (ferro) em W

Q_c : potência reativa necessária para produzir o fluxo mútuo em VAr

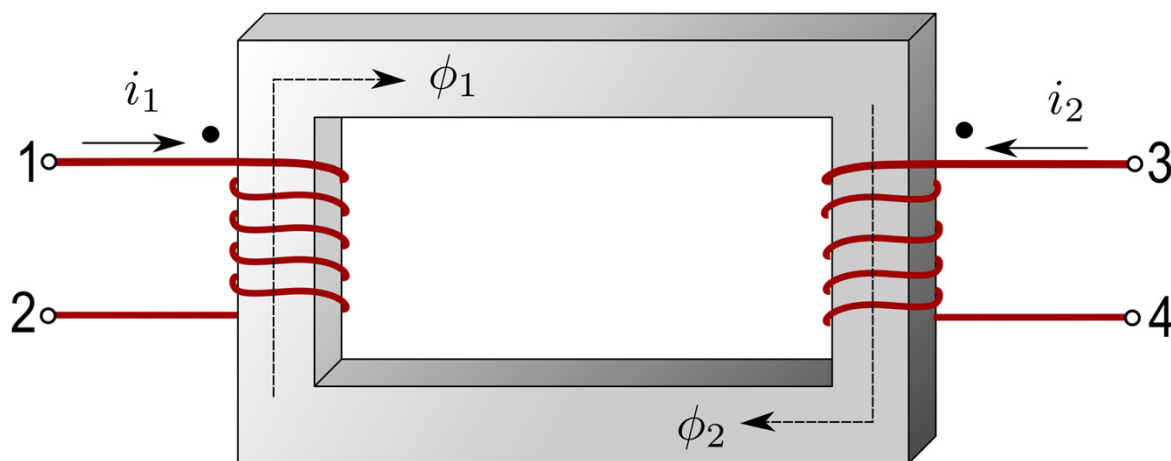
Circuito equivalente (4/8)

- O modelo final é igual ao transformador ideal mais as impedâncias externas representando as perdas.
- O circuito elétrico equivalente T é dado por:



Polaridade dos enrolamentos do transformador

- Dois terminais são considerados de mesma polaridade quando correntes entrando nesses terminais produzem fluxo na mesma direção no núcleo magnético.




- Os terminais “1” e “3” têm polaridades iguais pois correntes que entram por esses terminais produzem fluxo na mesma direção (sentido horário).
- Os terminais “2” e “4” também tem polaridades iguais, as correntes que entram por esses terminais produzem fluxo na mesma direção (sentido anti-horário).
- Os enrolamentos de um transformador podem ser marcados para indicar os terminais de mesma polaridade

Rendimento (1/2)

- Os transformadores são projetados para operarem com alto rendimento.
- Os seguintes aspectos contribuem para que os transformadores apresentem valores baixos de perdas:
 - O transformador é uma máquina estática, ou seja, não tem partes rotativas, não apresentando, portanto, perdas por atrito no eixo e por resistência do ar no entreferro.
 - O núcleo é constituído por placas laminadas e dotadas de materiais de alta resistência elétrica, as quais têm o objetivo de minimizar as perdas por correntes parasitas.
 - Materiais com alta permeabilidade magnética são utilizados para diminuir as perdas por histerese.
 - Transformadores de alta potência apresentam rendimento maior que 99 %.

Rendimento (2/2)

- O rendimento de um transformador pode ser definido por.

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{SAIDA}}{P_{SAIDA} + P_{PERDAS}}$$

$$P_{PERDAS} = P_{ENTRADA} - P_{SAIDA}$$

- As perdas no transformador incluem:

- Perdas no núcleo (ferro) – P_C (perdas por correntes parasitas e perdas por histerese), podem ser determinadas pelo teste em vazio, ou a partir dos parâmetros do circuito equivalente.
- Perdas no cobre – P_{Cu} (perdas ôhmicas), podem ser determinadas se os parâmetros do transformador forem conhecidos (corrente nos enrolamentos e resistência dos enrolamentos)

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{SAIDA}}{P_{SAIDA} + P_C + P_{Cu}}$$

Exercicios (Não é para entregar!., não é uma atividade!)

1. Explique forma simples a lei de indução de Faraday e para que é utilizado.
2. Usando lei circuital de Ampère e a lei de indução de Faraday, explique o principio de funcionamento de um transformador.
3. Por que é importante o transformador em um sistema de energia elétrica.
4. Por que é importante desenvolver um circuito equivalente que represente o comportamento do transformador em regime permanente.
5. Desenhe o circuito equivalente T do transformador, identifique e explique o que representa cada um de seus componentes.