



Eixo Tecnológico  
**Controle e Processos Industriais**

**MÁQUINAS ELÉTRICAS I**  
Prof. Jorge Luiz Angeloni



# MÁQUINAS ELÉTRICAS I

## COMPETÊNCIA 1

- ▶ Entender o funcionamento do transformador.

## HABILIDADES A SEREM ATINGIDAS:

- ▶ H1- Analisar situações onde a lei de Faraday, a lei de Lenz e a regra de Fleming são aplicáveis.
- ▶ H2- Entender o funcionamento de transformadores.

# MÁQUINAS ELÉTRICAS I

## BASES TECNOLÓGICAS NECESSÁRIAS:

- ▶ B1- Lei de Faraday;
- B2- Lei de Lenz e Regra de Fleming;
- B3- Tensão induzida em espiras que cortam o campo magnético;
- B4- Funcionamento de transformadores.

# INTRODUÇÃO

- ▶ A energia elétrica, produzida em grande quantidade nas usinas, precisa ser transmitida até os centros consumidores e, por sua vez, distribuída a cada consumidor. Portanto, em um sistema de geração, transmissão e distribuição costumam coexistir grandes e pequenos fluxos de energia (Profa. Ana Barbara k. Sambaqui).

# Representação de um sistema elétrico

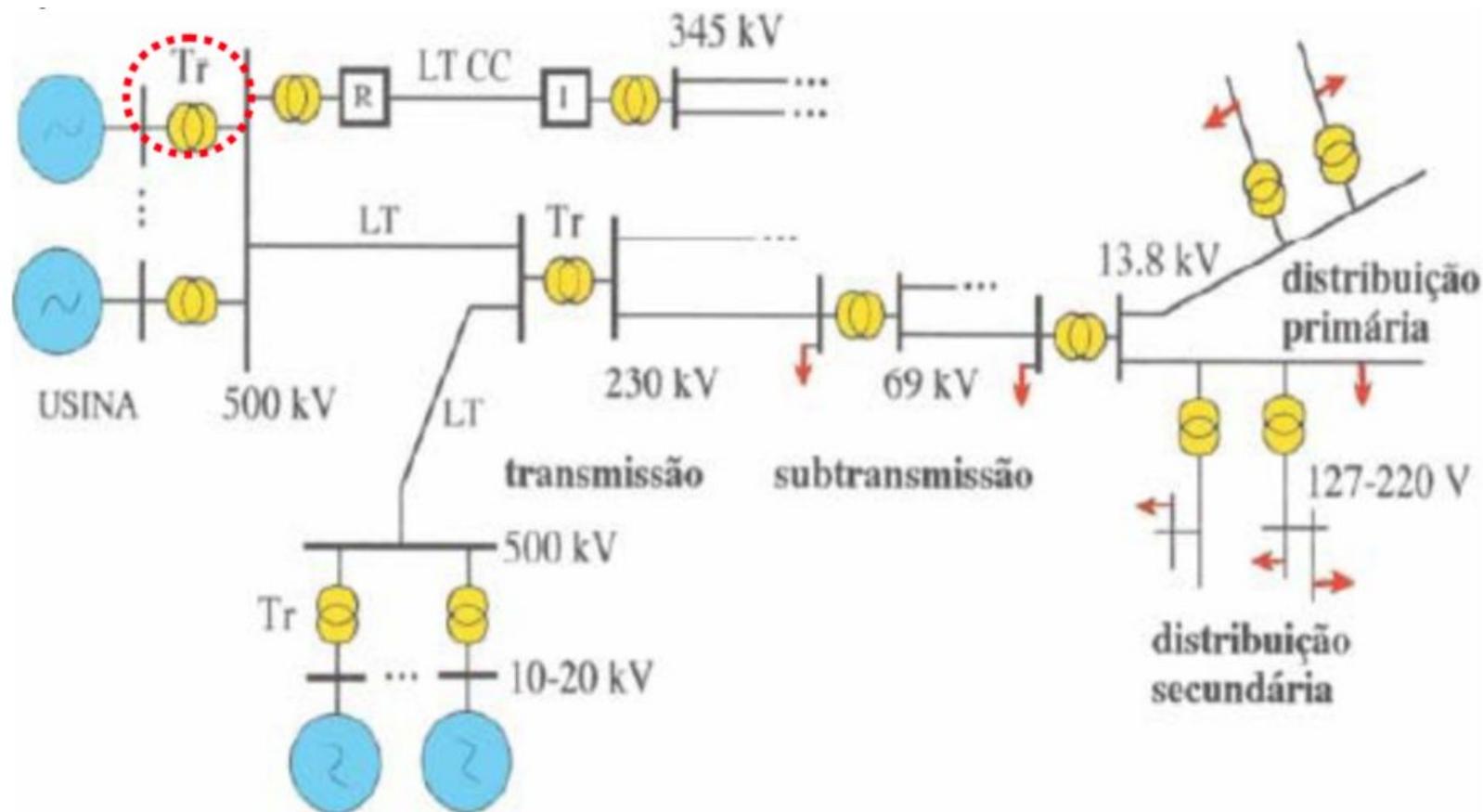
LEGENDA:

~ - corrente alternada Tr - transformador

LT - Linha transmissão CC - corrente contínua R - retificador

I - inversor

→ - carga



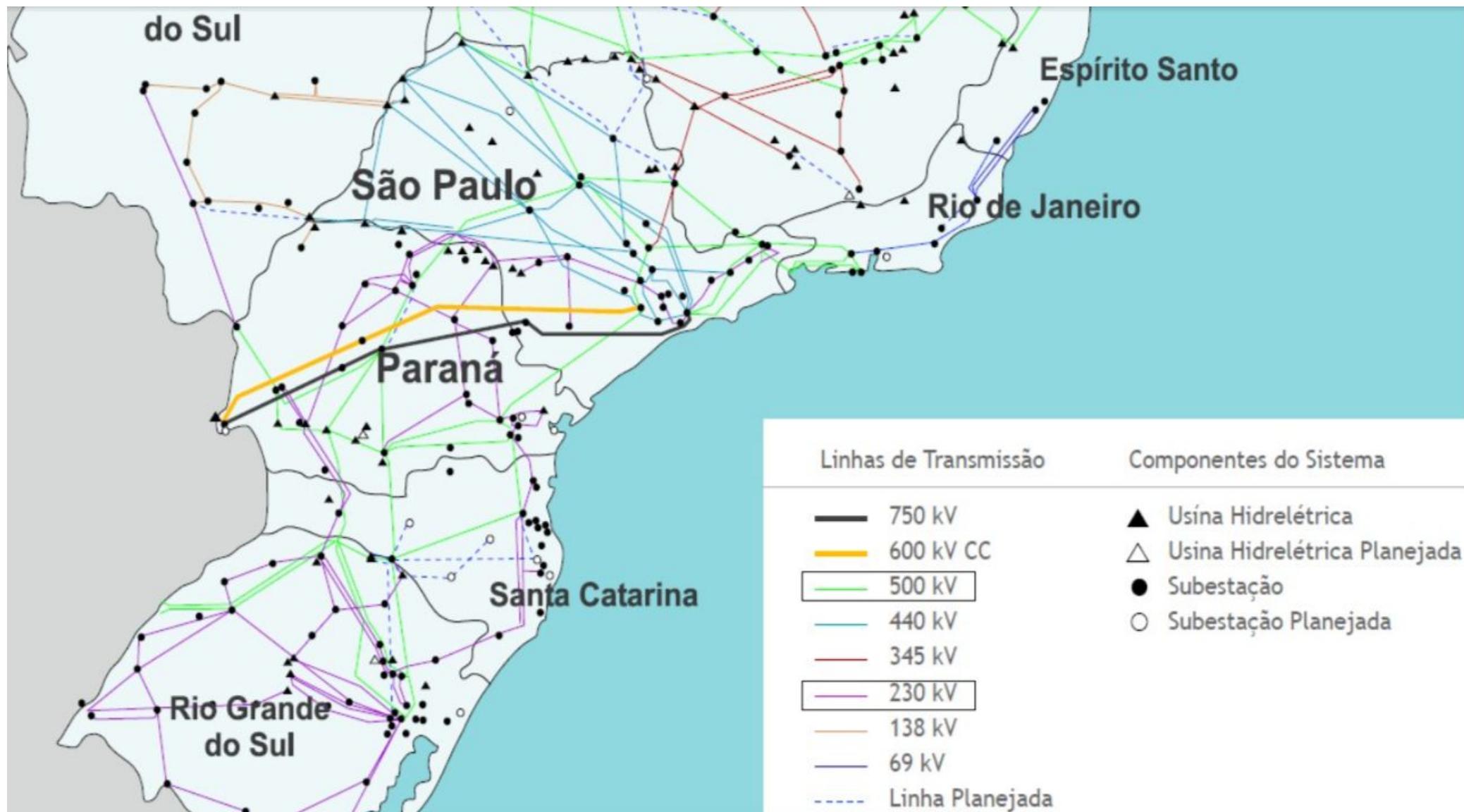
# Sistema elétrico

- ▶ No transporte de energia elétrica, **quanto MAIOR a tensão, MAIOR a potência transmitida**. Isso então permite controlar a quantidade de potência transmitida simplesmente variando o **nível de tensão** ao longo do sistema, o que é facilmente realizado, em circuitos de **corrente alternada**, através de **TRANSFORMADORES** (Profa. Ana Barbara k. Sambaqui).

# Tensão de linha mais utilizadas no Brasil

- ▶ Transmissão: 230kV, 440kV, 500kV, 600 kV(CC), 750kV;
- ▶ Subtransmissão: 69kV, 138kV;
- ▶ Distribuição primária: 11.9kV, 13.8kV, 23kV, 34.5kV;
- ▶ Distribuição secundária: 115V, 127V, 220V;
- ▶ Sistemas industriais: 220V, 380V, 440V, 2.3kV, 4.16kV e 6.6kV.

# TRANSMISSÃO INTEGRADA AO SISTEMA BRASILEIRO



# Maquete de uma subestação



# DEFINIÇÃO

A **ABNT** (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define o **TRANSFORMADOR** como:

- ▶ Um **dispositivo** que por meio da **indução eletromagnética**, **TRANSFERE** energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário), usando a **MESMA** **freqüência**, mas, geralmente, com **tensões** e intensidades de **correntes DIFERENTES**.

# DEFINIÇÃO

Então, o **TRANSFORMADOR** é um **CONVERSOR** de **energia eletromagnética**, cuja operação pode ser”

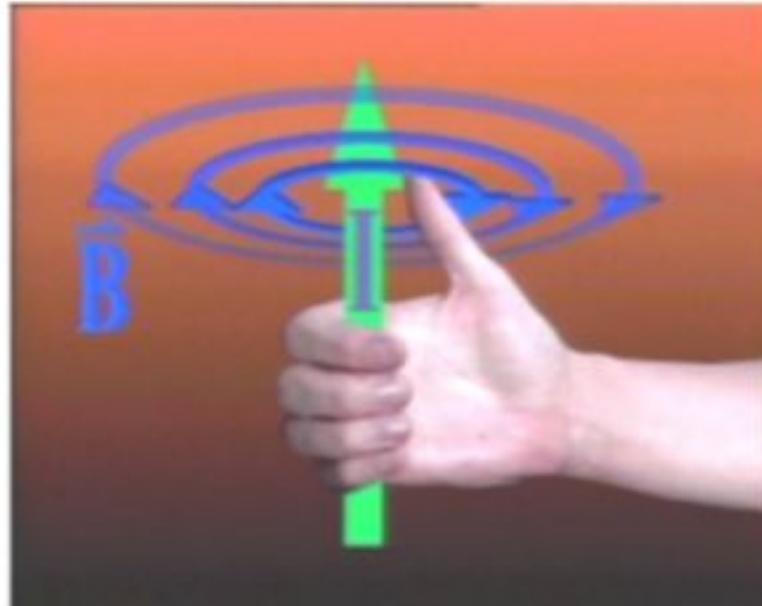
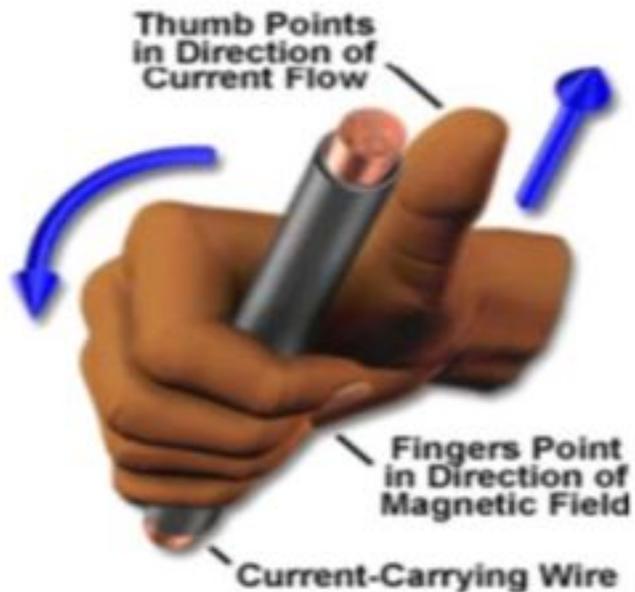
- ▶ **energia eletromagnética** explicada em termos do comportamento de um **circuito magnético** excitado por uma **corrente circuito magnético**.

# Princípio de funcionamento

- ▶ Todo **Transformador** é uma máquina elétrica cujo princípio de funcionamento está baseado nas leis de *Oersted*, *Ampère*, *Faraday* e *Lenz* (**Indução Eletromagnética**):

# LEI DE OERSTED

- ▶ “Todo condutor percorrido por uma corrente elétrica, cria em torno de si um campo magnético”.



- ▶ **Regra de Ampère – Regra da Mão Direita**  
Mão **direita** envolvendo o condutor com o **polegar** apontando para o sentido **convencional** da corrente elétrica, os demais **dedos** indicam o sentido das linhas de **campo** que envolvem o condutor.

# Campo Eletromagnético gerado no centro de uma Bobina Longa ou Solenóide

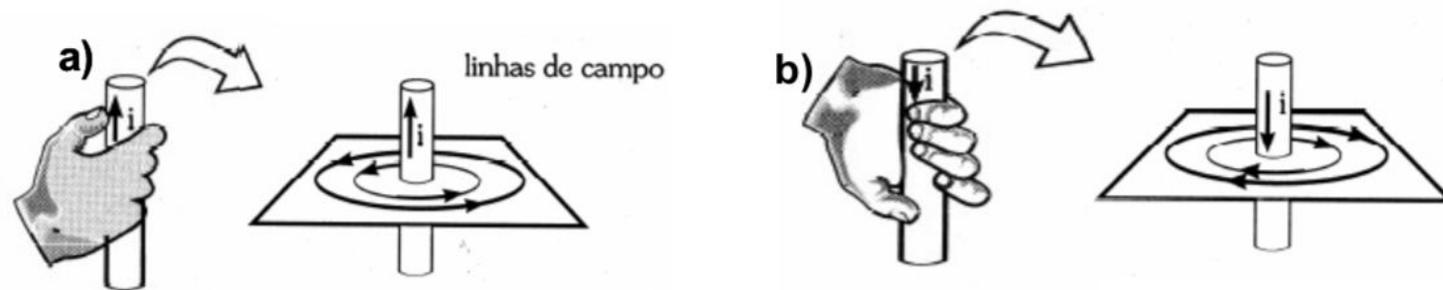


Figura 3.4 - Lei de Ampère e regra da mão direita (Fonte: Chiquetto e Parada; Física Eletricidade vol.3 ed. Scipione, 1992).

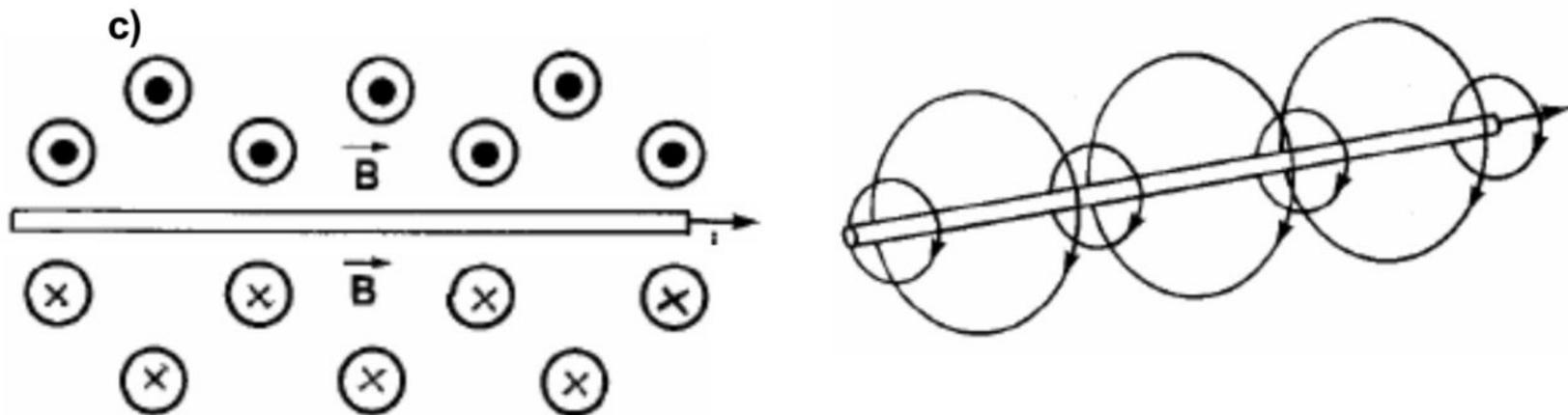


Figura 3.6 - Campo Eletromagnético produzido por um condutor; a) em perspectiva; b) indicado no plano.

# Campo Eletromagnético gerado no centro de uma Bobina Longa ou Solenóide

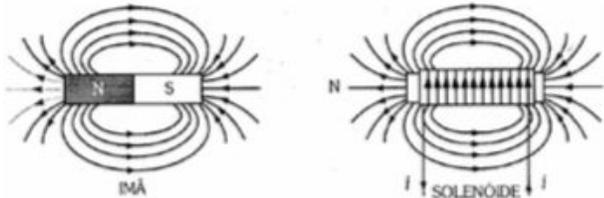


Figura 4.7. Campo Magnético de um ímã em barra e de um solenóide são semelhantes (Fonte: Gozzi, Giuseppe G. M., Circuitos Magnéticos, Coleção Estude e Use, Ed. Érica, 1996).

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

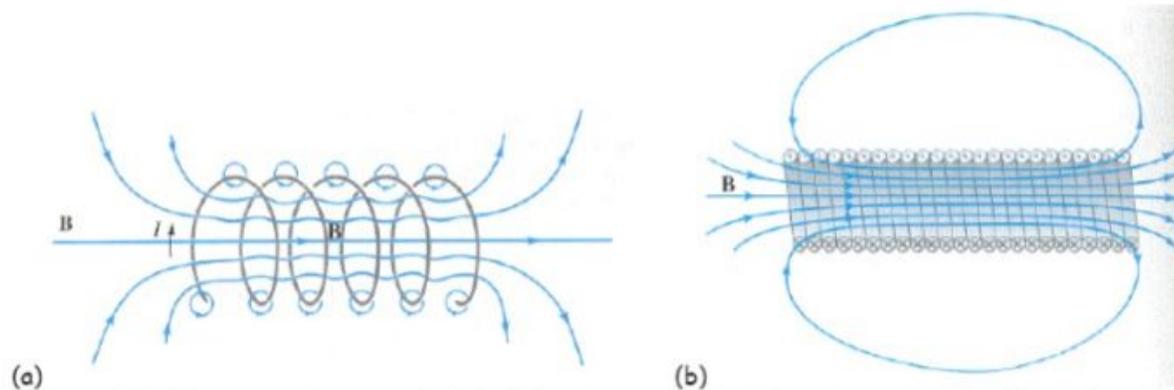


Figura 4.8 - Campo magnético no solenóide: (a) espiras separadas; (b) espiras justapostas (Fonte: Giancoli).



Figura 4.9 - Regra da mão direita aplicada a uma bobina.

**H** – Campo Magnético [A/m]; **N** – número de espiras;  
**I** – corrente elétrica [A];  
**l** – comprimento da bobina [m].

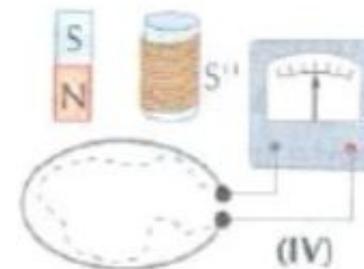
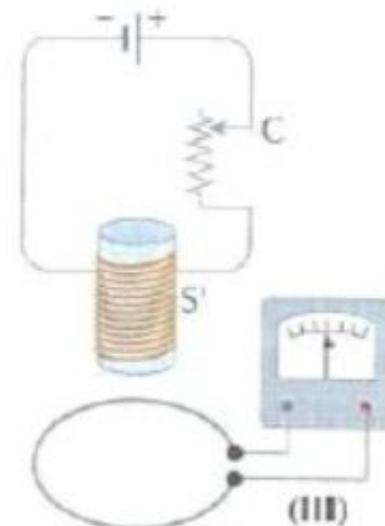
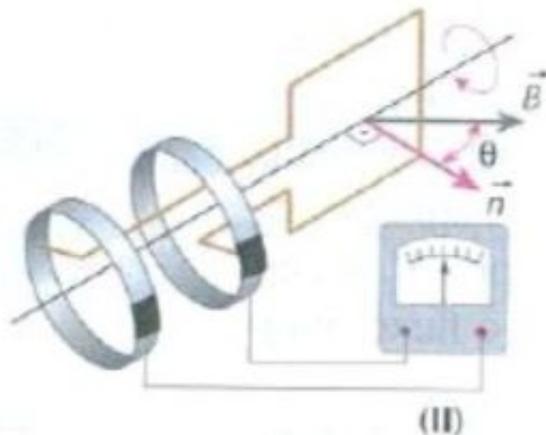
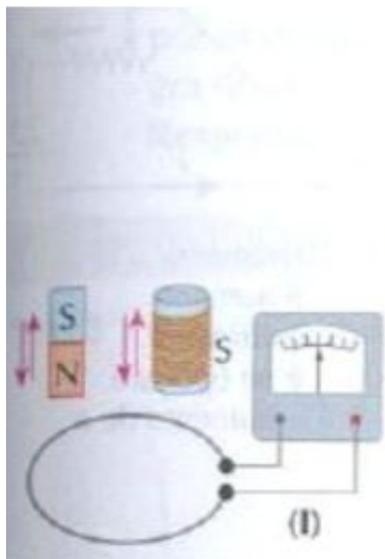
# LEI DE FARADAY

- ▶ Em todo condutor enquanto sujeito a uma **variação** de fluxo magnético ( $\Delta\Phi$ ) é estabelecida uma força eletromotriz (**tensão induzida** (e) em Volts”.

<http://educyclopedia.karadimov.info/library/faradyanim.gif>

# Como fazer o fluxo magnético ( $\Phi$ ) variar?

$$\Phi = B \cdot A \cdot \text{sen}\theta$$

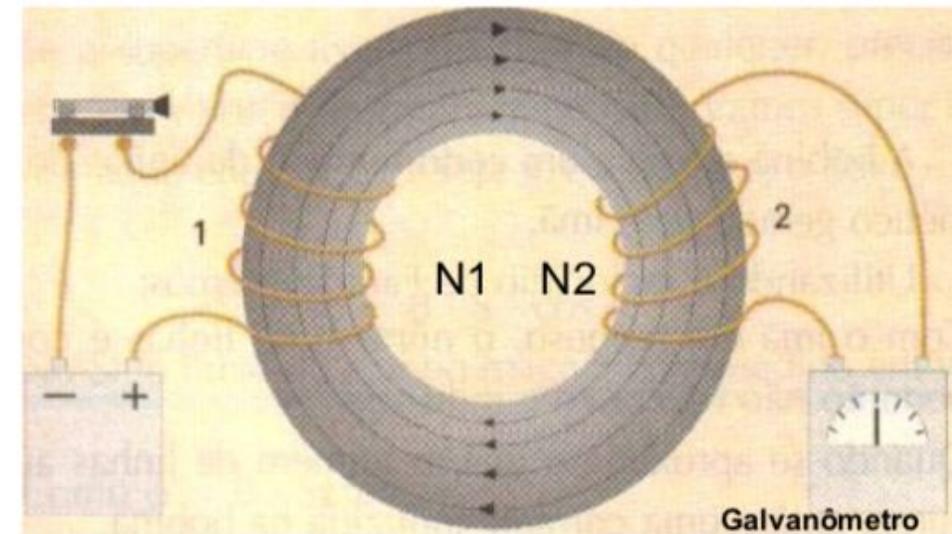
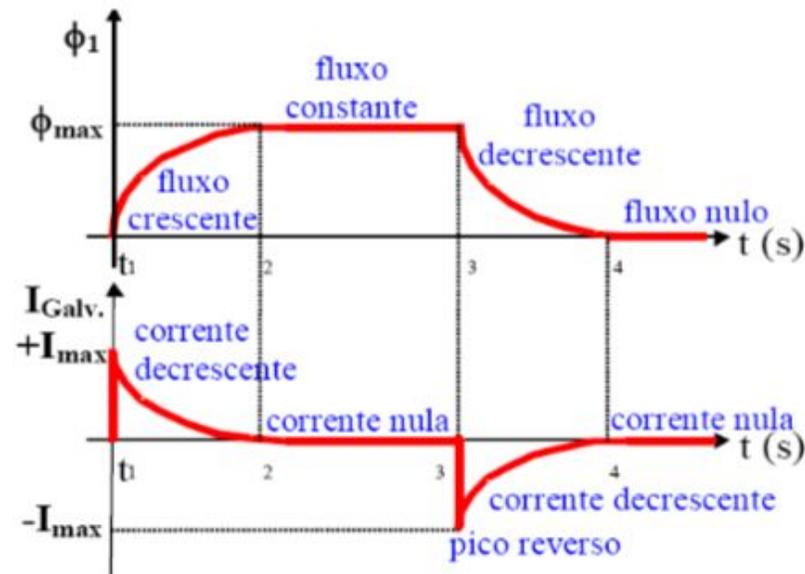
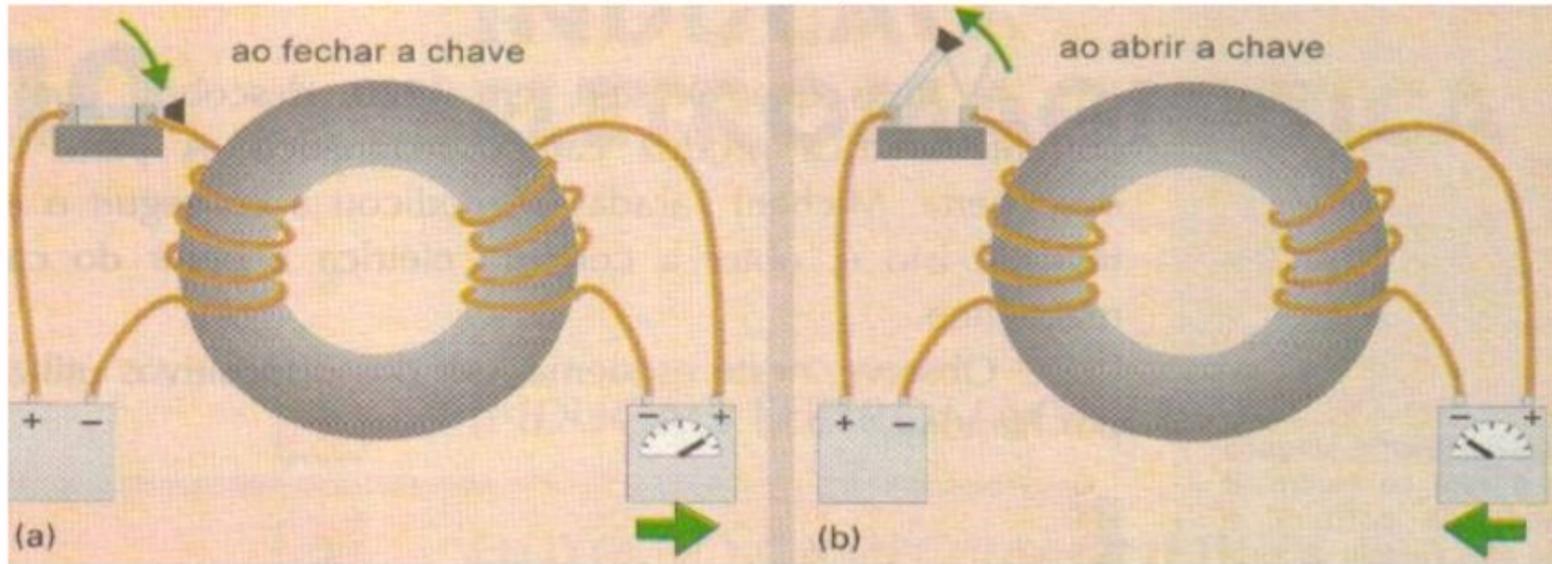


- ▶ I – variação de B (indução magnética em Tesla), condutor parado.
- ▶ II - variação de  $\theta$  (teta, ângulo entre B e A), condutor em movimento.
- ▶ III - Variação de B, condutor parado.
- ▶ IV – Variação de A (área da espira), condutor em movimento.

# Experimento de Faraday

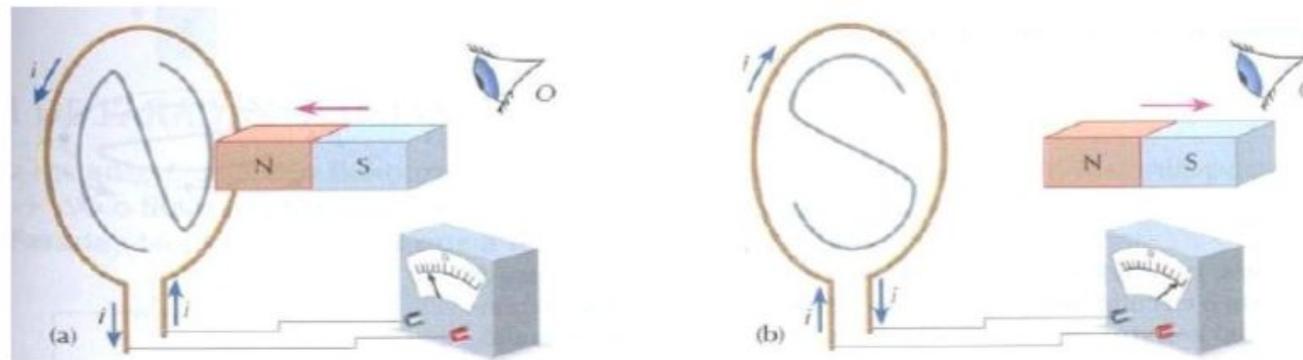
- ▶ a) ao fechar a chave;
- ▶ b) ao abrir a chave

(Fonte: Chiquetto, 1996).

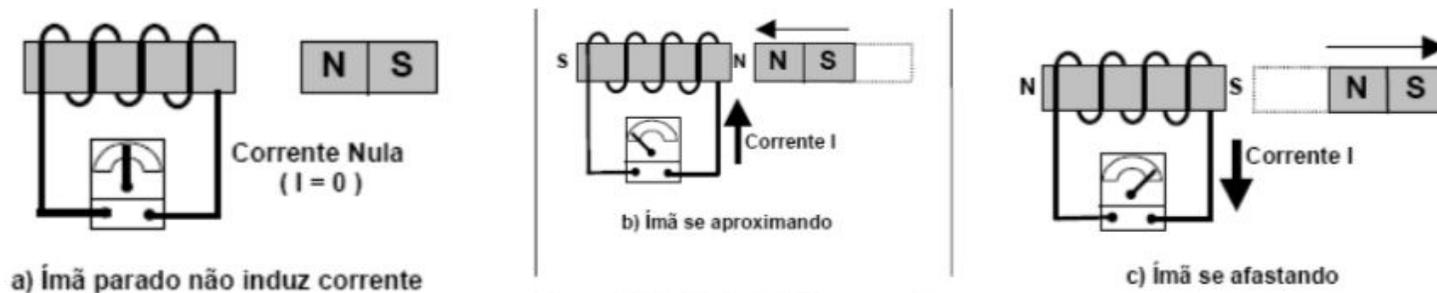


# LEI DE LENZ

- ▶ “O sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se **opõe** à variação do fluxo magnético indutor”



Sentido da corrente induzida



a) Ímã parado não induz corrente

b) Ímã se aproximando

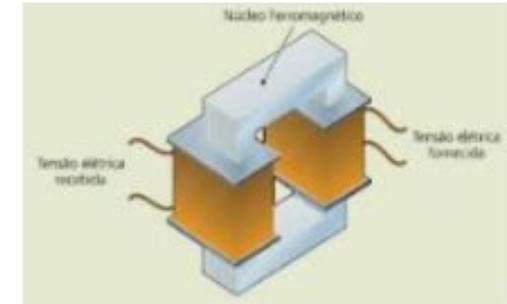
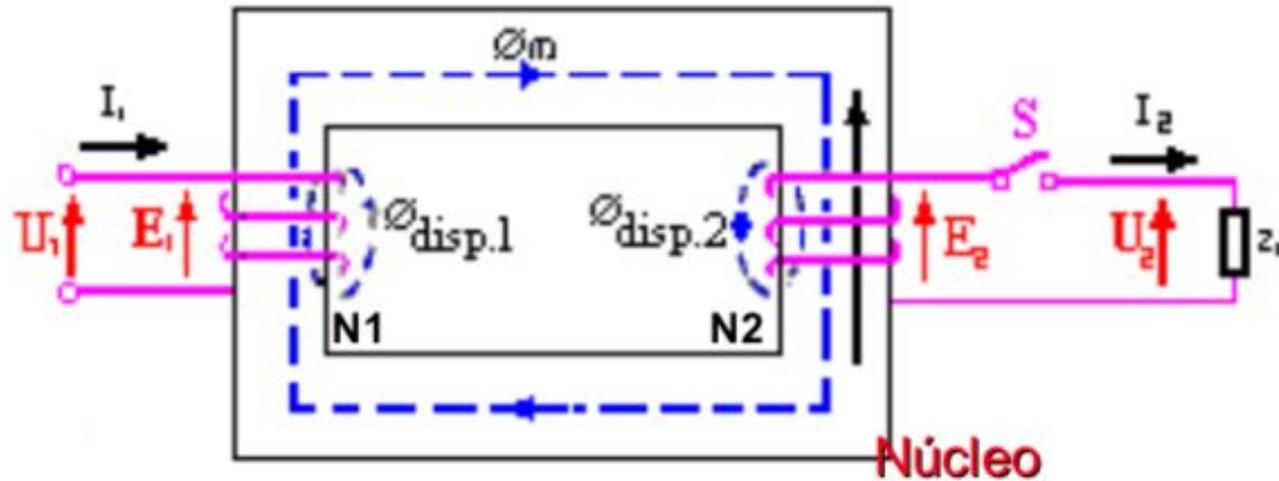
c) Ímã se afastando

Figura 7.6 - Indução Eletromagnética  
Máquinas Elétricas I

# LEI DE LENZ

- ▶ Se aplicarmos uma tensão **U1 ALTERNADA** ao **PRIMÁRIO**, circulará por este enrolamento uma **CORRENTE I1 alternada**, que por sua vez dará condições ao surgimento de um **FLUXO MAGNÉTICO** também **alternado ( $\varphi_m$ )**.
- ▶ A maior parte deste FLUXO ficará confinado ao **núcleo**, uma vez que é este o caminho de **MENOR RELUTÂNCIA**.
- ▶ Este FLUXO dará origem a uma FORÇA-ELETROMOTRIZ induzida (f.e.m) **E1** no primário e **E2** no secundário (**Lei de Faraday**) proporcionais ao NÚMERO DE ESPIRAS dos respectivos enrolamentos, **N1** e **N2**.

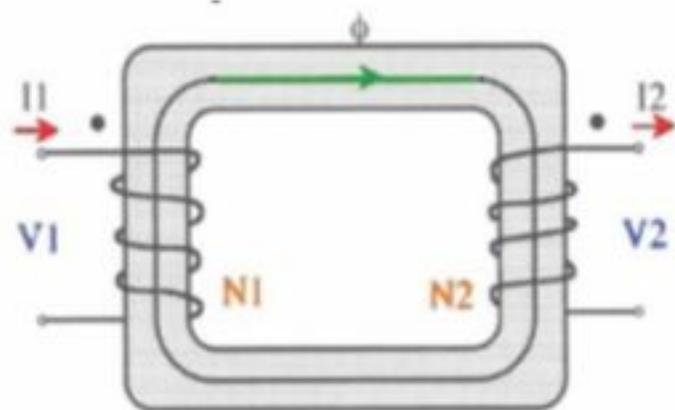
# LEI DE LENZ



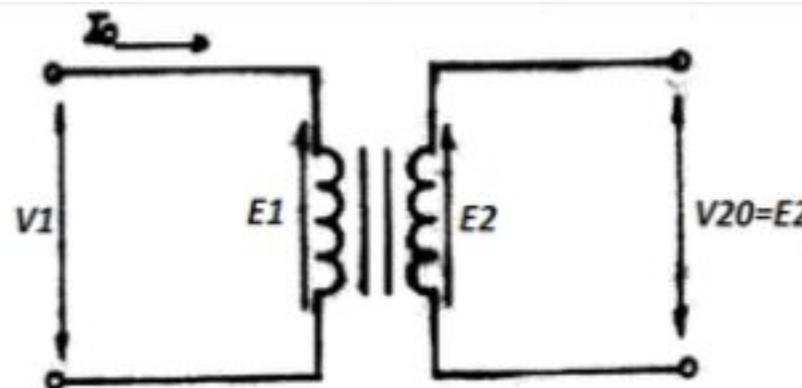
- ▶ **PRIMÁRIO** é o lado que **RECEBE ENERGIA**.  
**SECUNDÁRIO** é o lado que **ALIMENTA** a **CARGA**.

# Transformador IDEAL ou sem perdas

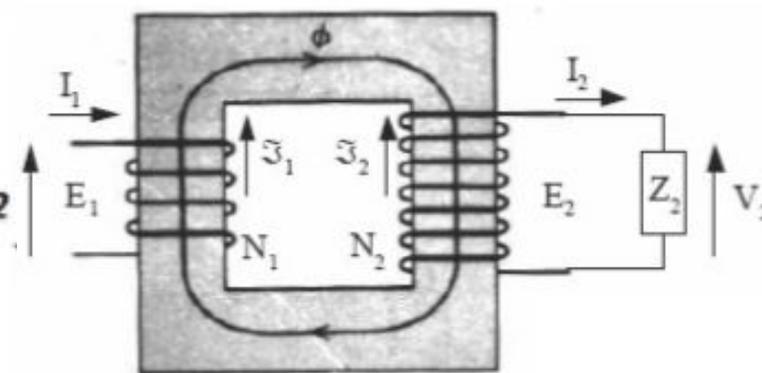
- ▶ O atendimento a edificações de uso coletivo pode ser realizado em baixa tensão para demandas de potencia de até 225 KVa, e o tipo de atendimento pode ser feito através de rede aérea, utilizando cabo multiplexado , com até 131 KVa de demanda.



- ▶ A vazio



Modelo elétrico



com carga

# Equação fundamental dos transformadores

- ▶  $S_1 = S_2$  (POTÊNCIA APARENTE em VA)

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- ▶ Se  $a > 1$ , o trafo é **ABAIXADOR** de tensão.

- ▶ Se  $a < 1$ , o trafo é **ELEVADOR** de tensão.

- ▶ Se  $a = 1$ , o trafo é **ISOLADOR**.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

- ▶ onde:

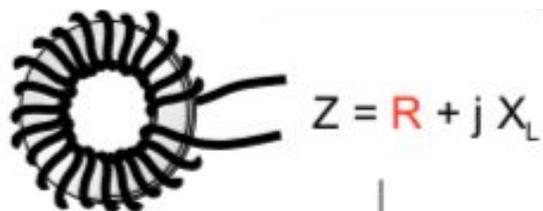
$a$ : relação de transformação.

$V_1, V_2$ : tensão nos enrolamentos primário e secundário, [V].

$N_1, N_2$ : número espiras nos enrolamentos primário e secundário.

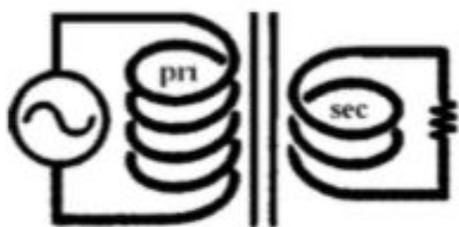
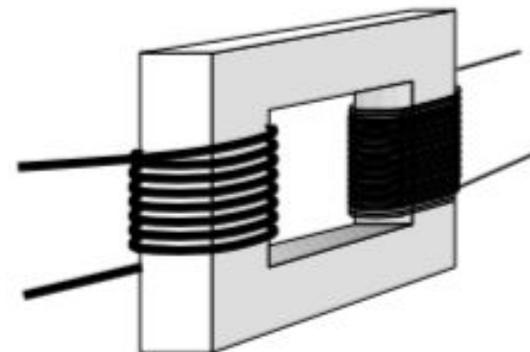
$I_1, I_2$ : correntes nos enrolamentos primário e secundário, [A].

# Transformador REAL ou com perdas

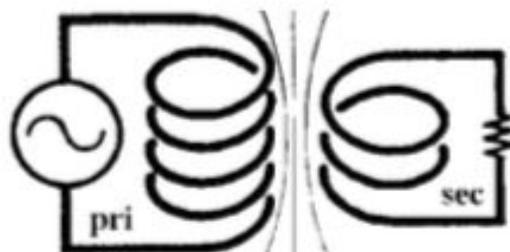


**AQUECIMENTO** →

Limitação de  $I$  (1 ou 2)



**Perda no cobre**



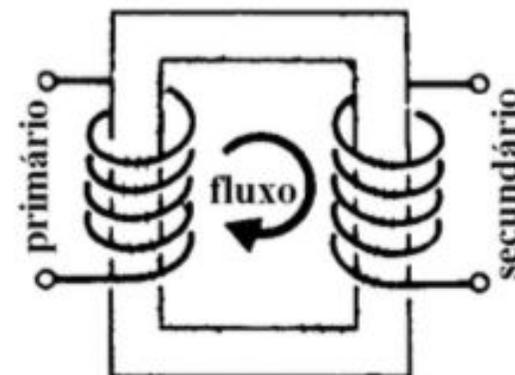
Fluxo perdido

**Perda de Fluxo**



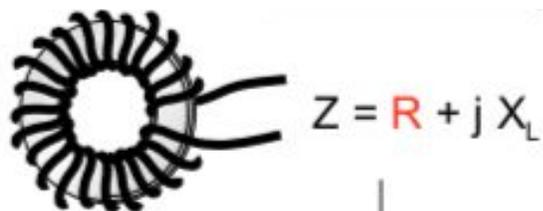
Força Magnetizante

**Perda por Histerese**



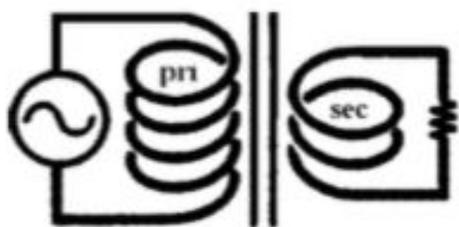
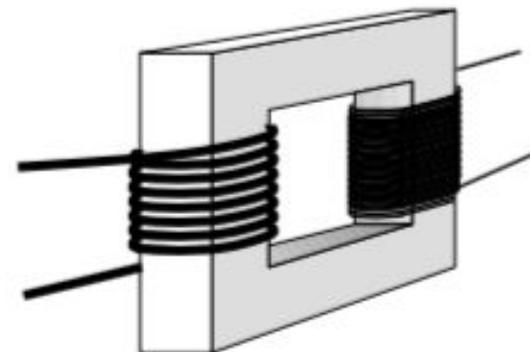
**Perda por corrente parasita**

# Transformador REAL ou com perdas

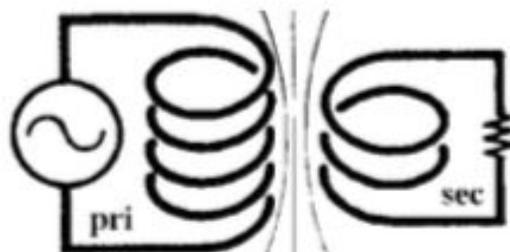


**AQUECIMENTO** →

Limitação de  $I$  (1 ou 2)



**Perda no cobre**



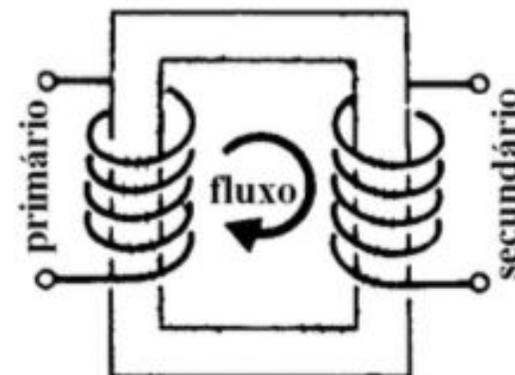
Fluxo perdido

**Perda de Fluxo**



Força Magnetizante

**Perda por Histerese**

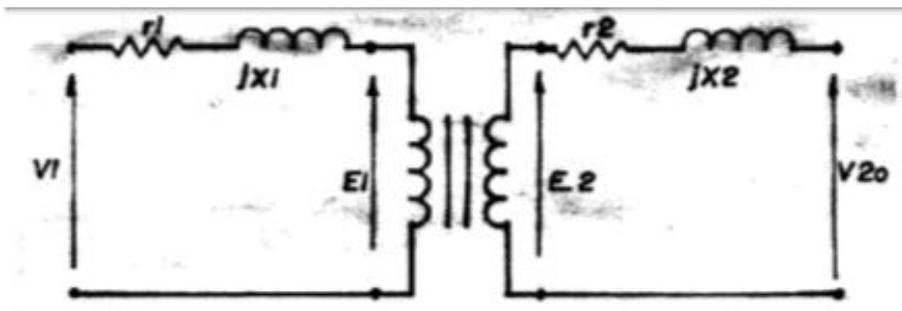


**Perda por corrente parasita**

# Transformador REAL ou com perdas

- ▶ **Perda no cobre:** devido à resistência dos fios nos enrolamentos ( $P=RI$ );
- ▶ **Perda de Fluxo Perda por Histerese Perda por corrente parasita**
- ▶ **Perdas de fluxo:** devido ao fluxo que não é enlaçado pelos enrolamentos e o núcleo;
- ▶ **Perdas por Histerese:** devido à energia para alinhar os domínios magnéticos e inverter o alinhamento com a inversão da corrente.
- ▶ **Perdas por corrente parasita:** devido a corrente induzida que flui no
- ▶ **Perdas por corrente parasita** núcleo (para evitar utiliza-se um núcleo laminado ou chapas).

# Modelo elétrico do transformador real



Onde:

$r_1$  → resistência do enrolamento primário;

$x_1$  → reatância de dispersão do enrolamento primário =  $2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1$

$E_1$  → fem (força eletromotriz) induzida no primário;

$r_2$  → resistência do enrolamento secundário;

$x_2$  → reatância de dispersão do enrolamento secundário =  $2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_2$

$E_2$  → fem (força eletromotriz) induzida no secundário.

Para o circuito primário, tem-se:

$$V_1 = (r_1 + jx_1)I_1 + E_1$$

No qual se faz:  $r_1 + jx_1 = Z_1$

Onde:

$Z_1$  → Impedância do enrolamento primário.

Para o circuito secundário:

$$E_2 = (r_2 + jx_2)I_2 + V_2$$

No qual se faz:  $r_2 + jx_2 = Z_2$

Onde:

$Z_2$  → Impedância do enrolamento secundário

# Bibliografia

SOARES, Tirson. Exercícios da apostila IFSC Campus Jaragá do Sul.