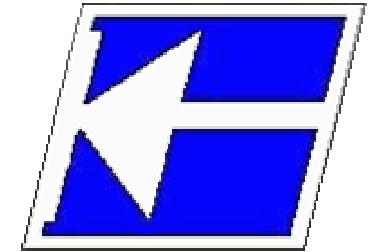


**Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina**  
**Departamento de Eletrônica**



**Retificadores**

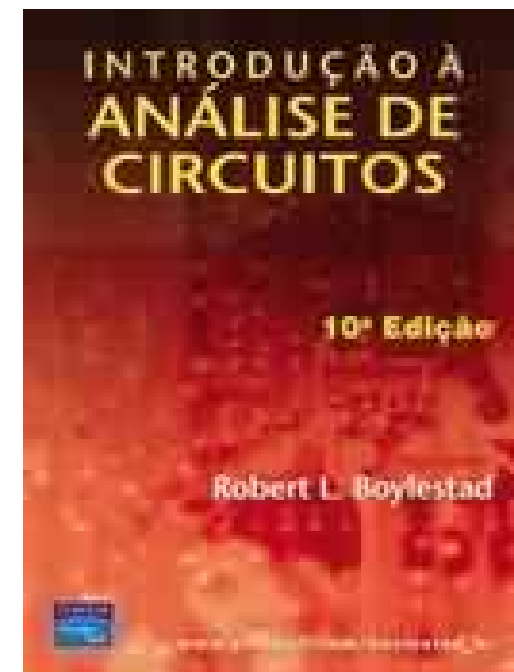


**Circuitos Magnéticos**  
**e**  
**Acoplamento Magnético**

**Clóvis Antônio Petry, professor.**

**Florianópolis, março de 2007.**

# Bibliografia para esta aula



## **Nesta aula**

---

### **Seqüência de conteúdos:**

1. Circuitos magnéticos;
2. Acoplamento magnético.

# Circuitos magnéticos

$$\phi = \frac{FMM}{\mathfrak{R}}$$

A soma das forças magneto-motrizas de um circuito série é nula

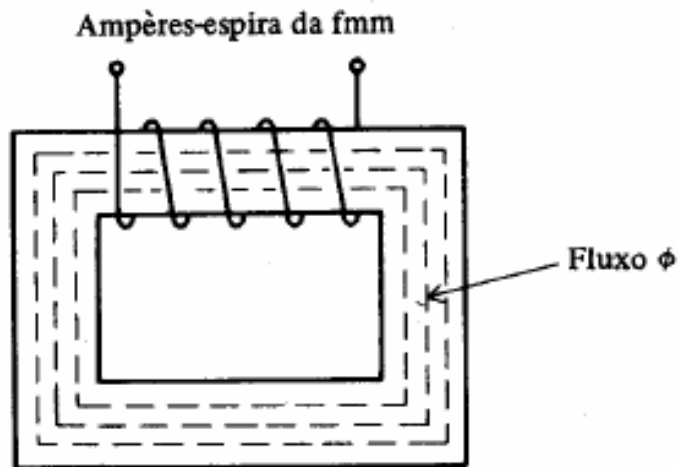
$$\longrightarrow \sum FMM = 0$$

Fonte de FMM:  $FMM = N \cdot I$

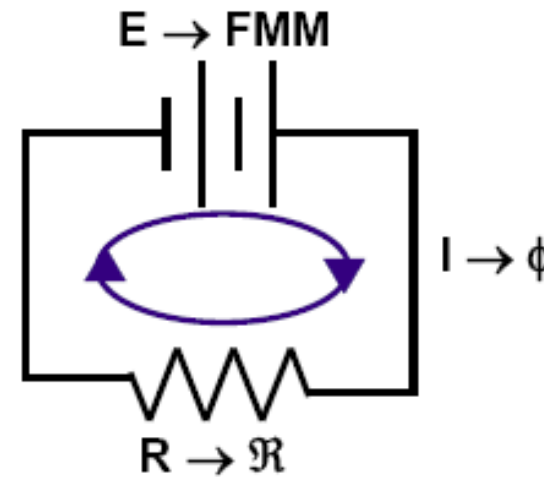
Quedas de FMM:  $FMM = H \cdot \ell$

	Circuitos Elétricos	Circuitos Magnéticos
Causa	<b>E</b>	<b>FMM</b>
Efeito	<b>I</b>	$\phi$
Oposição	<b>R</b>	$\mathfrak{R}$

# Circuitos magnéticos



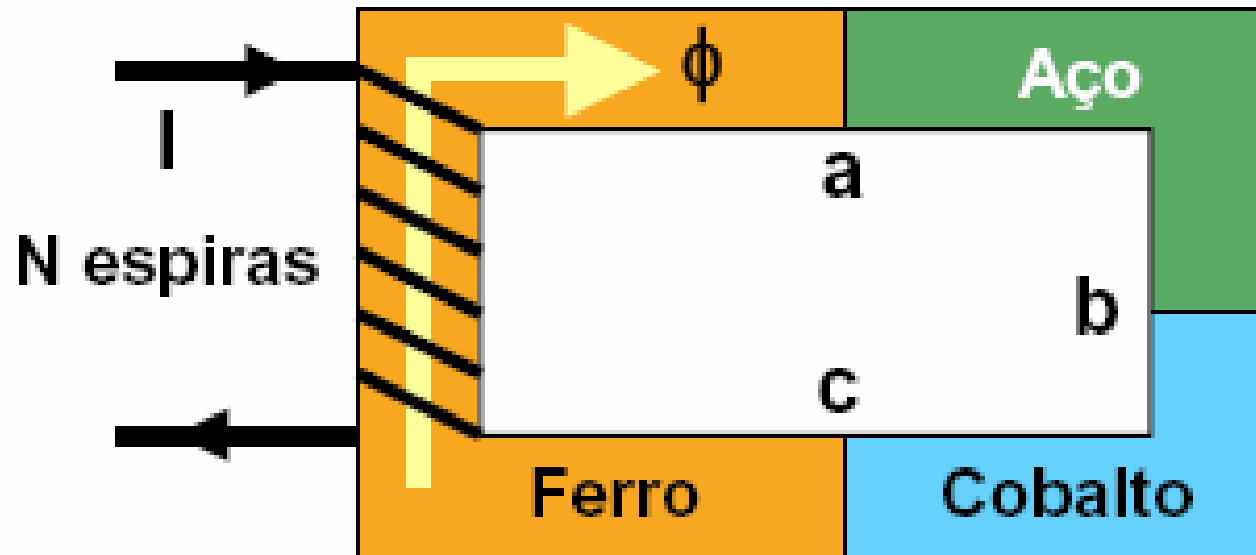
Circuito magnético



Equivalente elétrico

$$\sum \text{FMM} = 0$$
$$+ N \cdot I - H \cdot \ell = 0$$

# Circuitos magnéticos

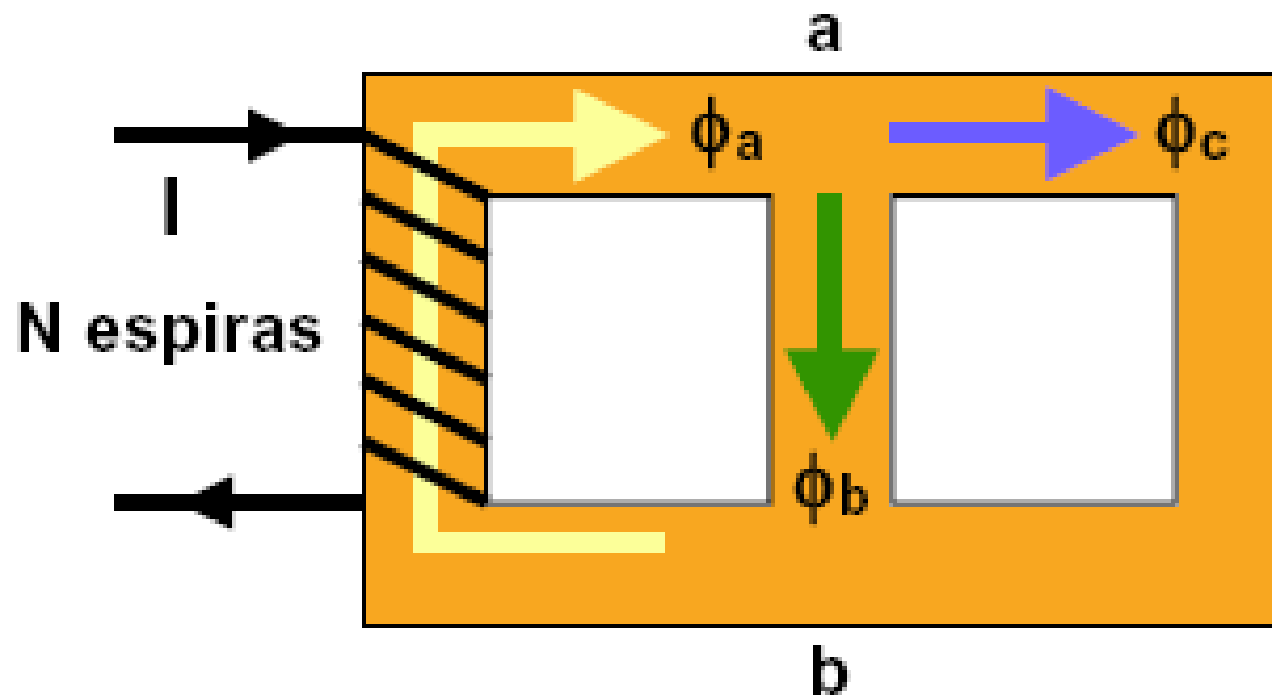


Circuito magnético série

$$\sum \text{FMM} = 0$$

$$+ N \cdot I - H_{ab} \cdot \ell_{ab} - H_{bc} \cdot \ell_{bc} - H_{ca} \cdot \ell_{ca} = 0$$

# Circuitos magnéticos



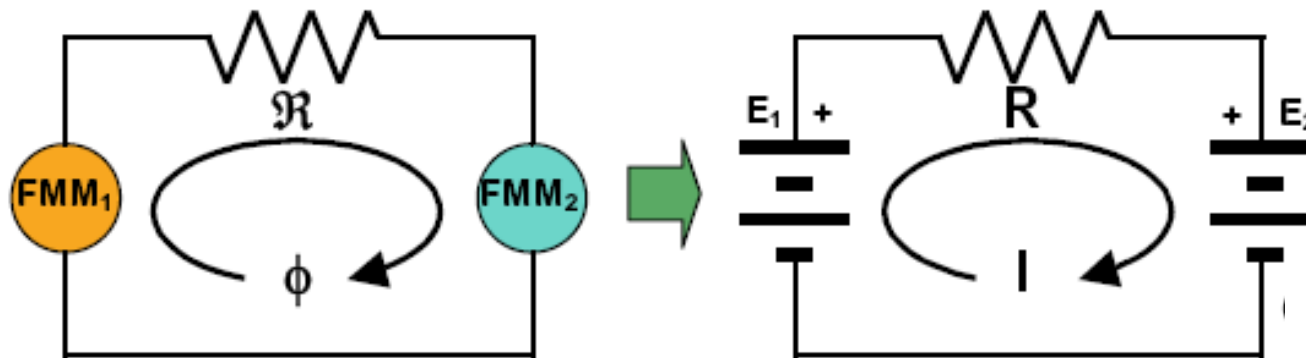
Circuito magnético paralelo

$$\sum \phi = 0$$

$$\phi_a - \phi_b - \phi_c = 0$$

$$\phi_a = \phi_b + \phi_c$$

# Circuitos magnéticos



Circuito magnético com duas bobinas

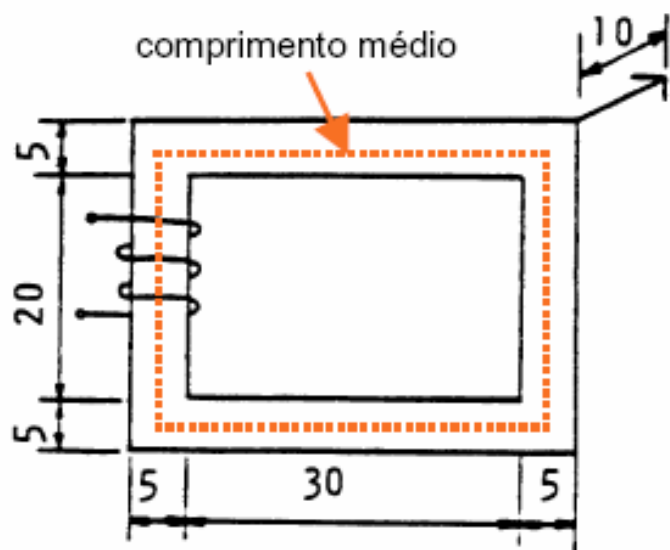
$$\sum \text{FMM} = 0$$

$$+ \text{FMM}_1 - H \cdot \ell - \text{FMM}_2 = 0$$

$$+ \text{FMM}_1 - \text{FMM}_2 = H \cdot \ell$$

# Circuitos magnéticos

## Circuito magnético série sem entreferro:



$$\ell = 25 + 35 + 25 + 35 = 120$$

$$\ell = 1,2 \text{ m}$$

$$B = \frac{\phi}{A \cdot k} \longrightarrow$$

Depende do  
fator de  
utilização

$$B = \frac{40 \cdot 10^{-4}}{(0,1 \cdot 0,05) \cdot 0,9} = 0,89$$

$$B = 0,89 \text{ T}$$

$$\sum \text{FMM} = 0$$

$$+ \text{FMM} - H \cdot \ell = 0$$

$$\text{FMM} = H \cdot \ell$$

$$\text{FMM} = H \cdot \ell = 130 \cdot 1,2 = 156$$

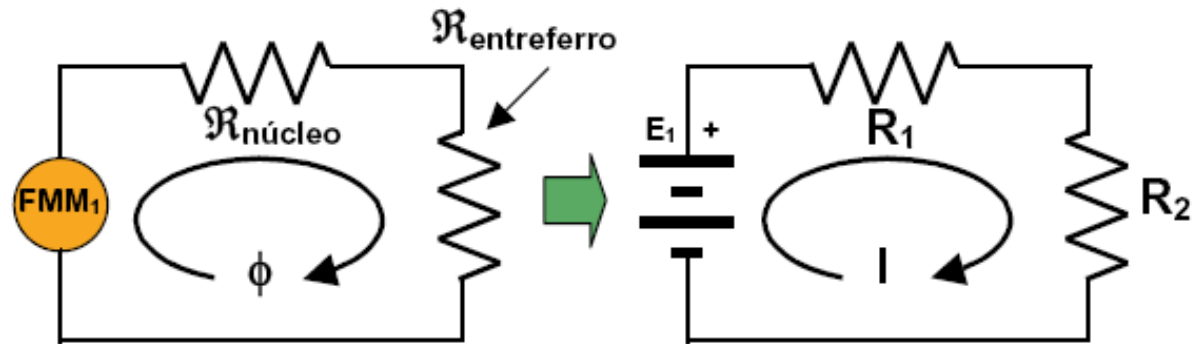
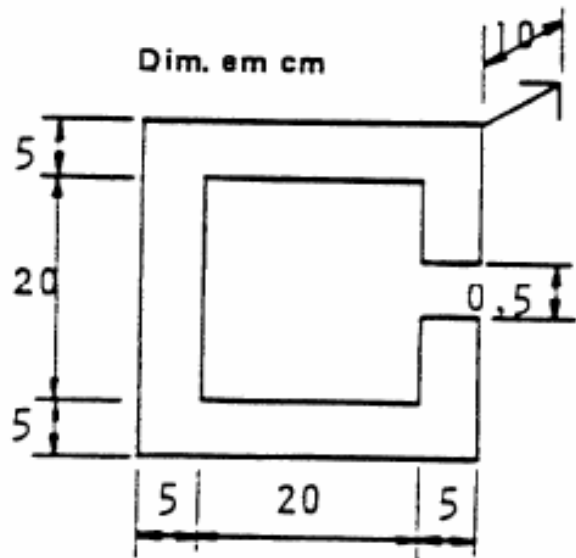
$$\text{FMM} = 156 \text{ A}$$

$$\text{FMM} = N \cdot I$$

$$I = \frac{\text{FMM}}{N} = \frac{156}{100} = 1,56$$

# Circuitos magnéticos

## Circuito magnético série com entreferro:



$$\ell = 25 + 25 + 25 + 25 - 0,5 = 99,5 \cdot 10^{-2} m$$

$$B_G = \frac{\phi}{d \cdot A_G} \longrightarrow$$

Depende do fator de dispersão

No entreferro  $\longrightarrow H_G = \frac{B_G}{\mu_G} = \frac{0,98}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 779859,22 \frac{Ae}{m}$

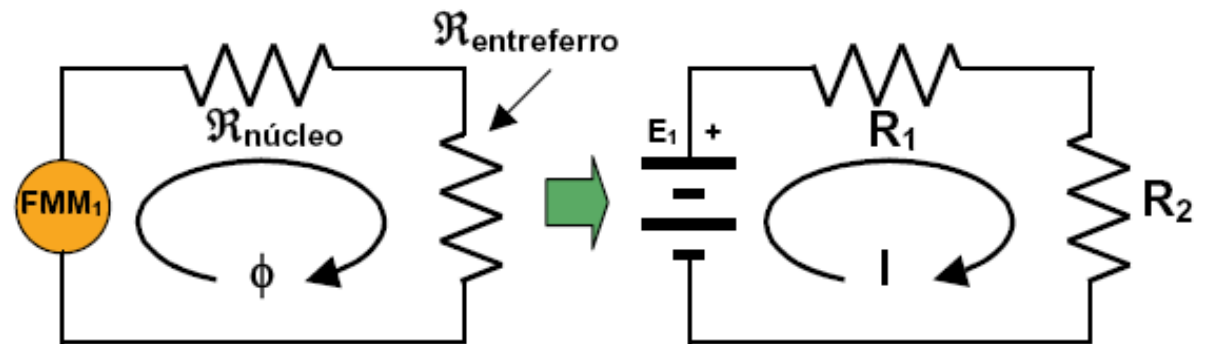
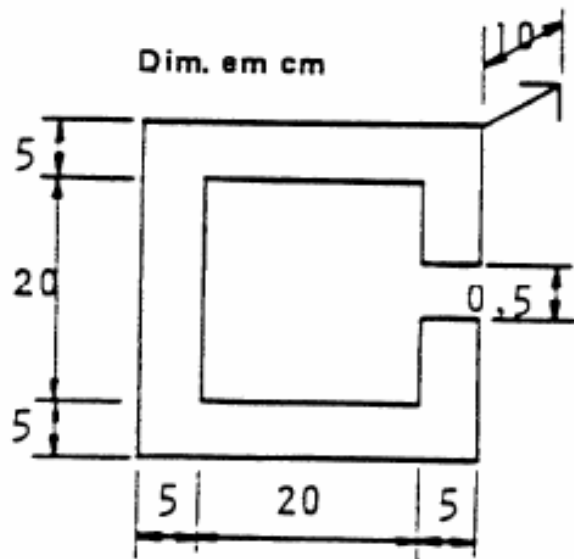
$$B_G = \frac{54 \cdot 10^{-4}}{1,1 \cdot A_N} = \frac{54 \cdot 10^{-4}}{1,1 \cdot (0,05 \cdot 0,1)} = 0,98 T$$

$$B_N = \frac{\phi}{k \cdot A_N} = \frac{54 \cdot 10^{-4}}{0,9 \cdot (0,05 \cdot 0,1)} = 1,2 T$$

No núcleo

# Circuitos magnéticos

## Circuito magnético série com entreferro:



$$\text{FMM no entreferro} \longrightarrow FMM_G = H \cdot \ell = 779859,22 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 3899,3 Ae$$

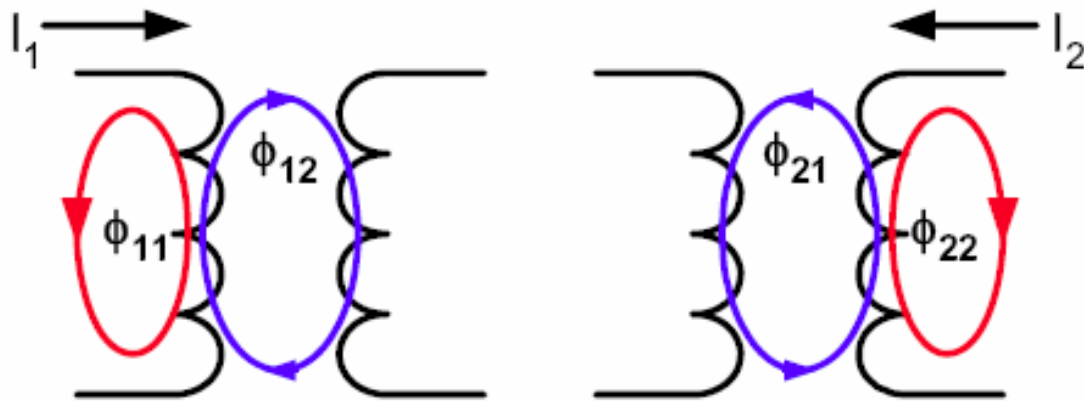
$$\text{FMM no núcleo} \longrightarrow FMM_N = H \cdot \ell = 310 \cdot 99,5 \cdot 10^{-2} = 308,45 Ae$$

$$\text{FMM total} \longrightarrow FMM_T = FMM_N + FMM_G = 3899,3 + 308,45 = 4207,7 Ae$$

$$I = \frac{FMM_T}{N} = \frac{4207,7}{1000} = 4,208 A$$

# Acoplamento magnético

Idéia geral:



$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$$

$$\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21}$$

$\phi_1$  - fluxo magnético total produzido pelo circuito 1;

$\phi_{11}$  - componente de fluxo gerado pelo circuito 1 vinculado somente ao circuito 1;

$\phi_{12}$  - componente de fluxo gerado pelo circuito 1 vinculado ao circuito 2. É o fluxo mútuo produzido pelo circuito 1;

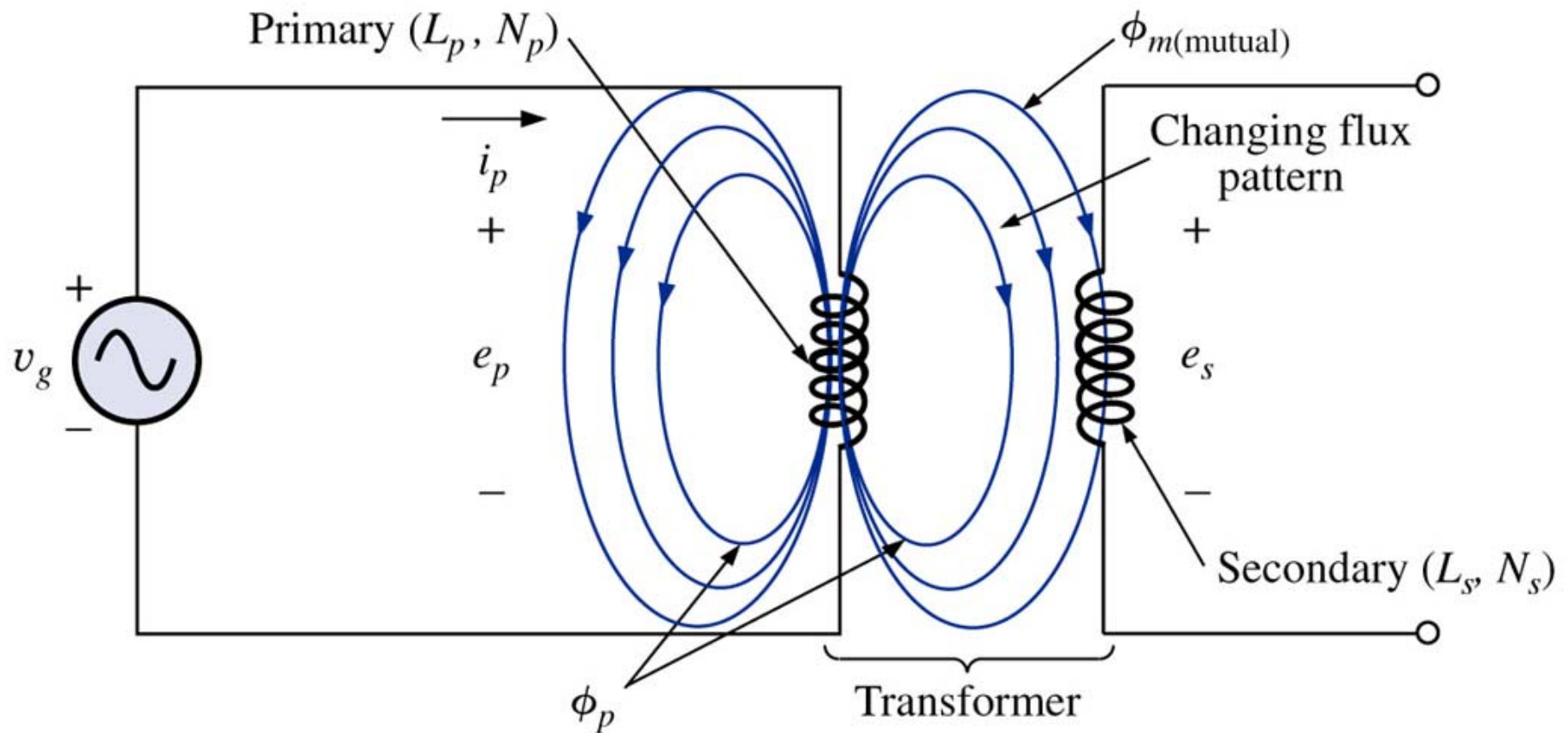
$\phi_2$  - fluxo magnético total produzido pelo circuito 2;

$\phi_{22}$  - componente de fluxo gerado pelo circuito 2 vinculado somente ao circuito 2;

$\phi_{21}$  - componente de fluxo gerado pelo circuito 2 vinculado ao circuito 1. É o fluxo mútuo produzido pelo circuito 2.

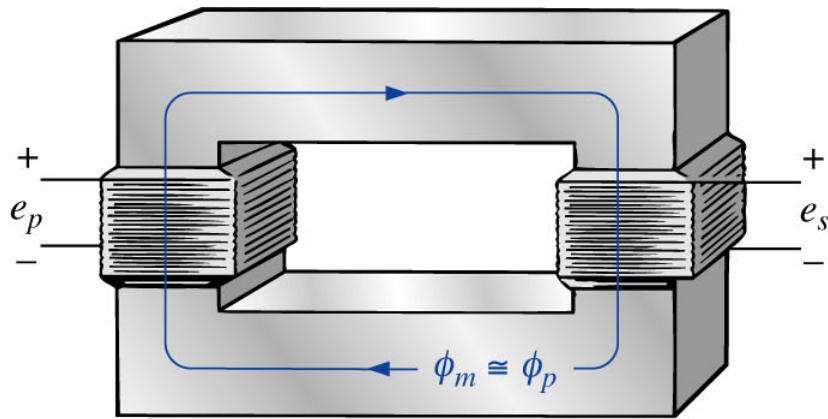
# Acoplamento magnético

Exemplo de aplicação:

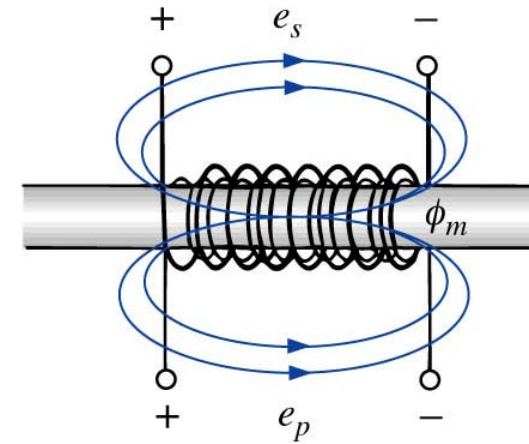


# Acoplamento magnético

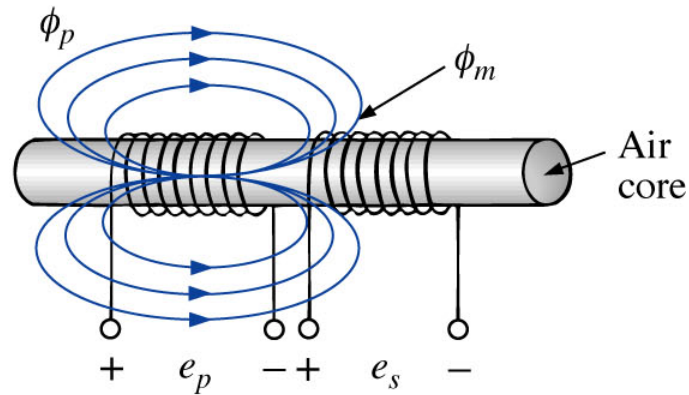
Coeficiente de acoplamento:



Steel core  
 $k \cong 1$



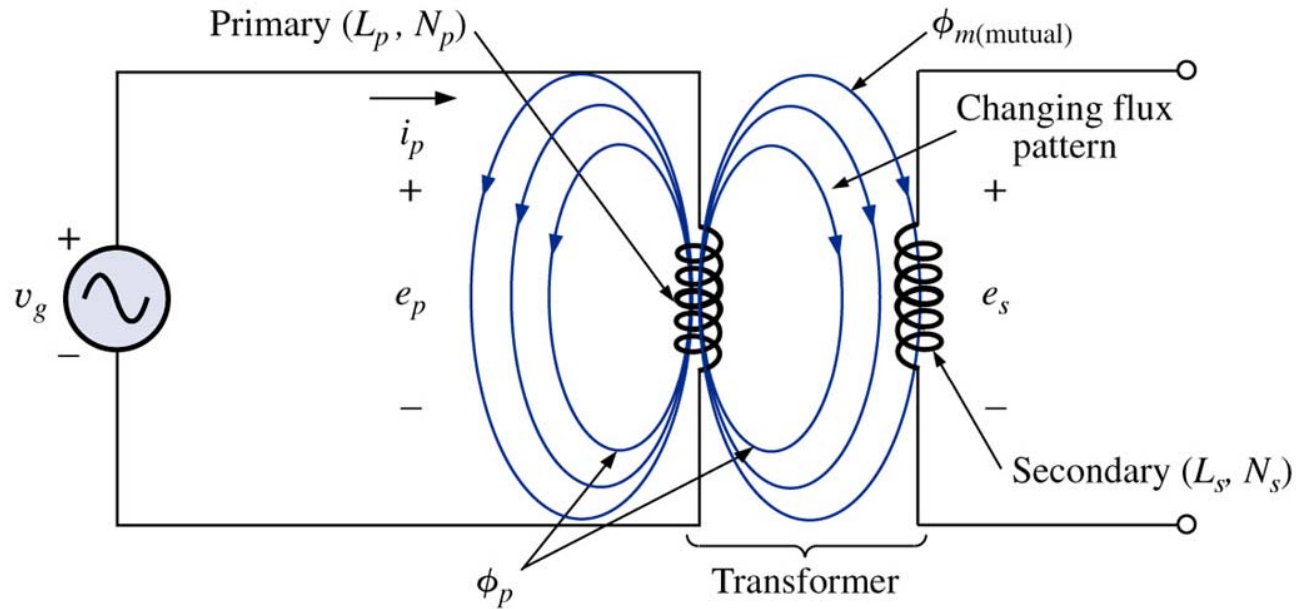
Any core  
 $k \cong 1$



$$k = \frac{\phi_m}{\phi_1} \ll 1 \text{ (0.01} \rightarrow \text{0.3)}$$

# Acoplamento magnético

## Indutância mútua:



$$M_{12} = N_2 \cdot \frac{d\phi_{12}}{di_1}$$

$$M_{21} = N_1 \cdot \frac{d\phi_{21}}{di_2}$$

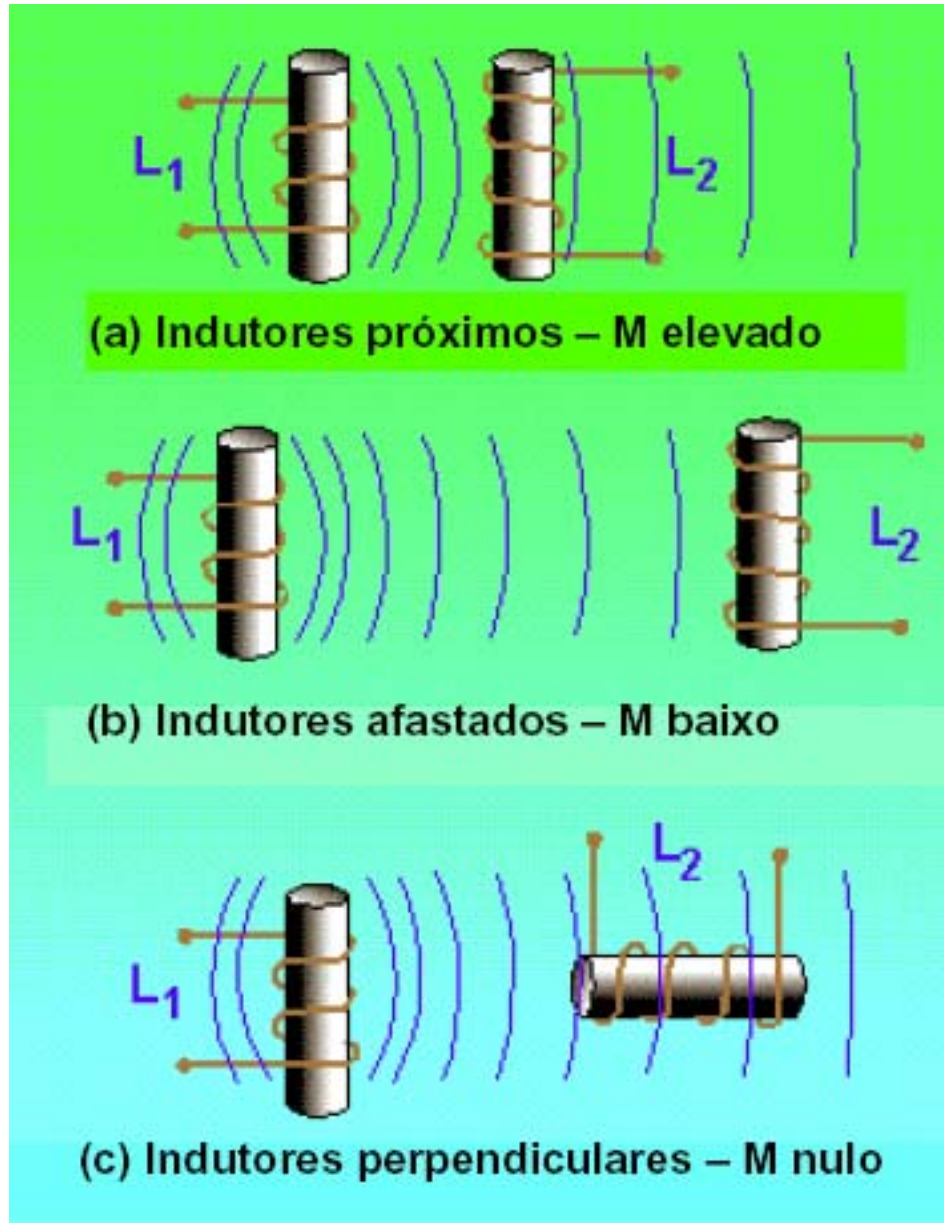
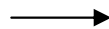
$$M_{12} = M_{21} = k \frac{N_2}{N_1} L_1 = k \frac{N_1}{N_2} L_2$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

# Acoplamento magnético

Indutância mútua:

O acoplamento interfere na indutância mútua



# Acoplamento magnético

Tensão de indução mútua:

$$\begin{aligned} M_{12} &= N_2 \cdot \frac{d\phi_{12}}{dI_1} \\ M_{21} &= N_1 \cdot \frac{d\phi_{21}}{dI_2} \end{aligned} \longrightarrow M = N \cdot \frac{d\phi}{dI} \longrightarrow N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -e$$

$$e_M = -M \cdot \frac{dI}{dt}$$

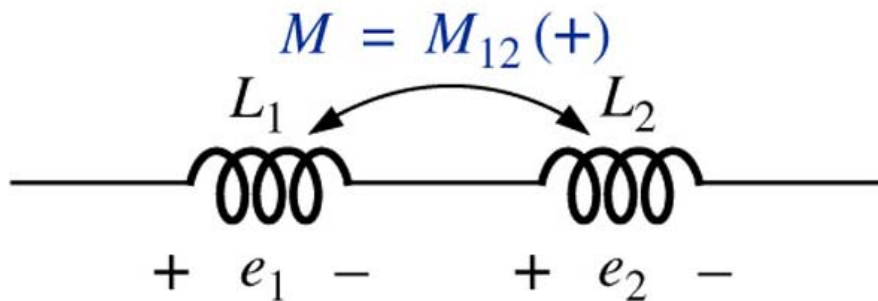
$e_M$  - tensão de indutância mútua [V];

$M$  - indutância mútua [H];

$dI/dt$  - função da variação da corrente no tempo [A/s]

# Acoplamento magnético

Indutância equivalente:



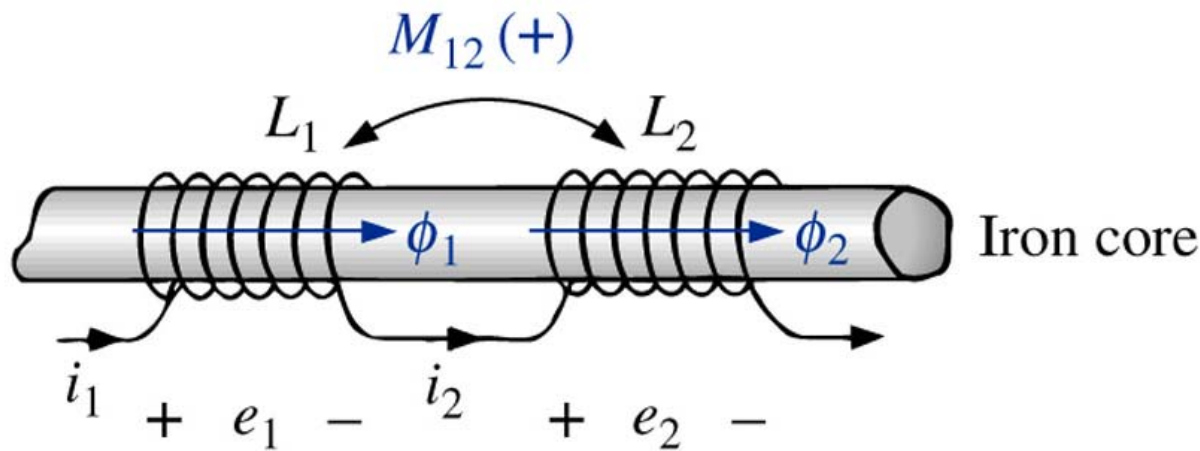
$$e_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt} = (L_1 + M) \frac{di(t)}{dt}$$

$$e_2(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M \frac{di_1(t)}{dt} = (L_2 + M) \frac{di(t)}{dt}$$

$$e_+(t) = (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di(t)}{dt}$$

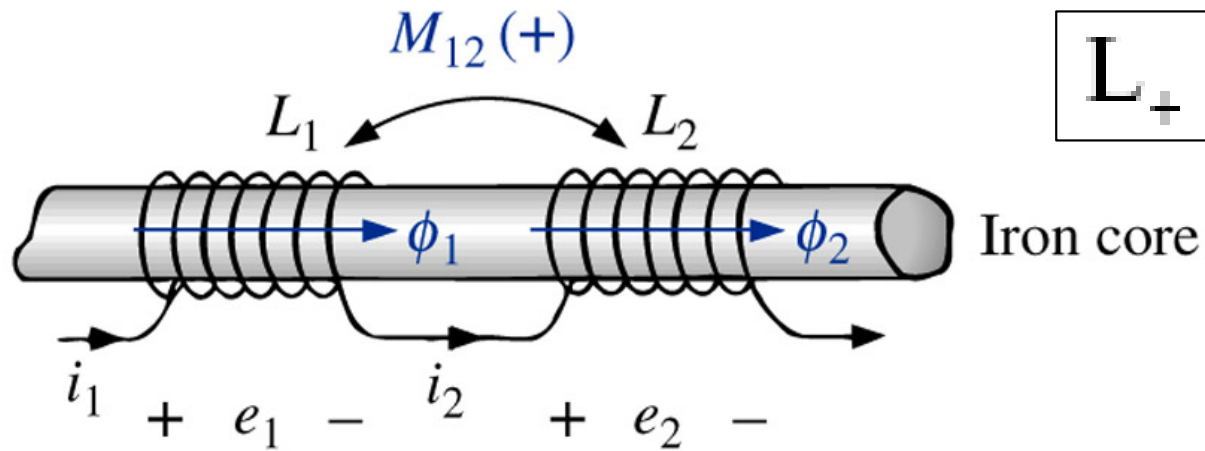
$$L_+ = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_- = L_1 + L_2 - 2M$$

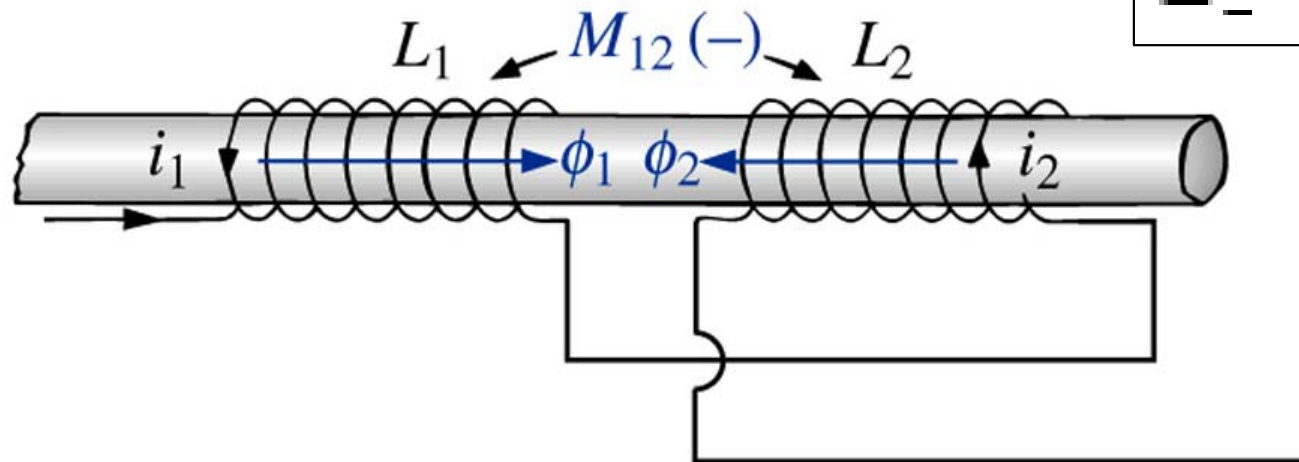


# Acoplamento magnético

Indutância equivalente:



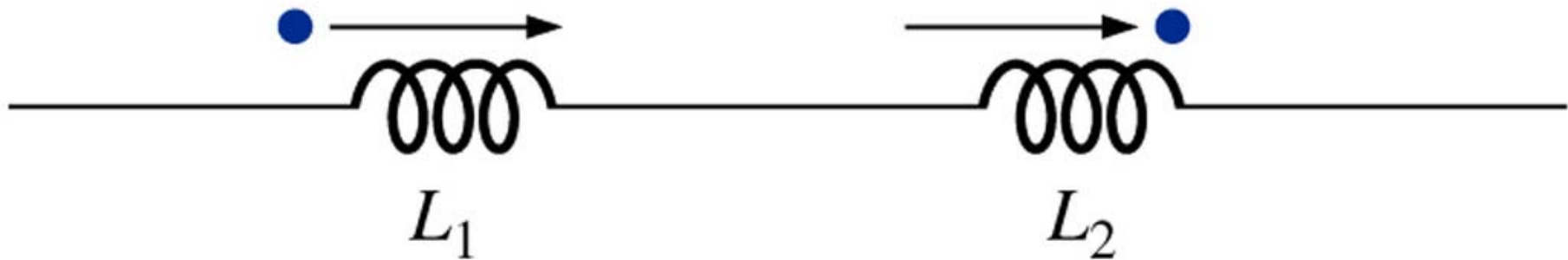
$$L_+ = L_1 + L_2 + 2M$$



$$L_- = L_1 + L_2 - 2M$$

# Acoplamento magnético

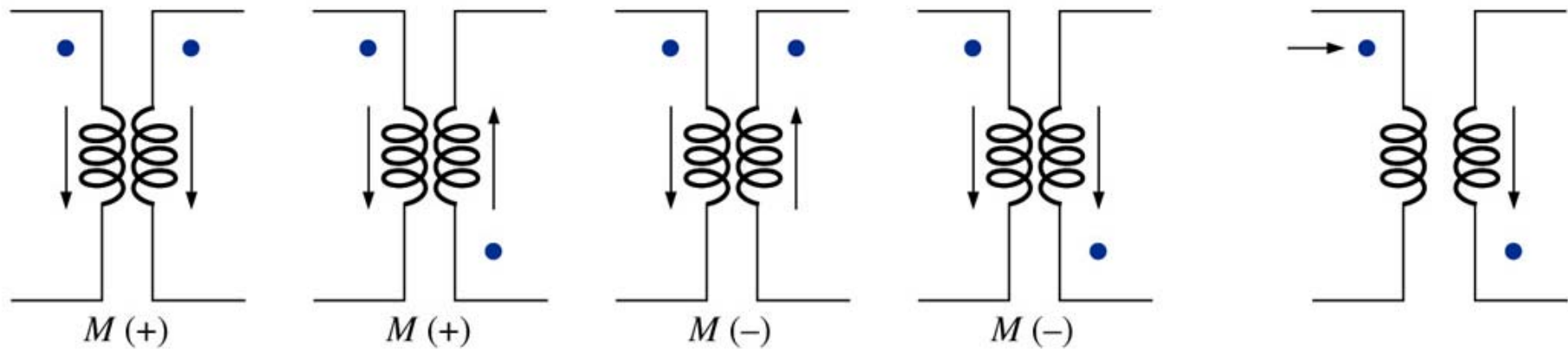
Polaridade de bobinas:



Convenção do ponto para indutores

# Acoplamento magnético

## Polaridade de bobinas:



Definição de  $M$  para enrolamentos mutuamente acoplados

# Na próxima aula

---

## **Seqüência de conteúdos:**

1. Transformadores.