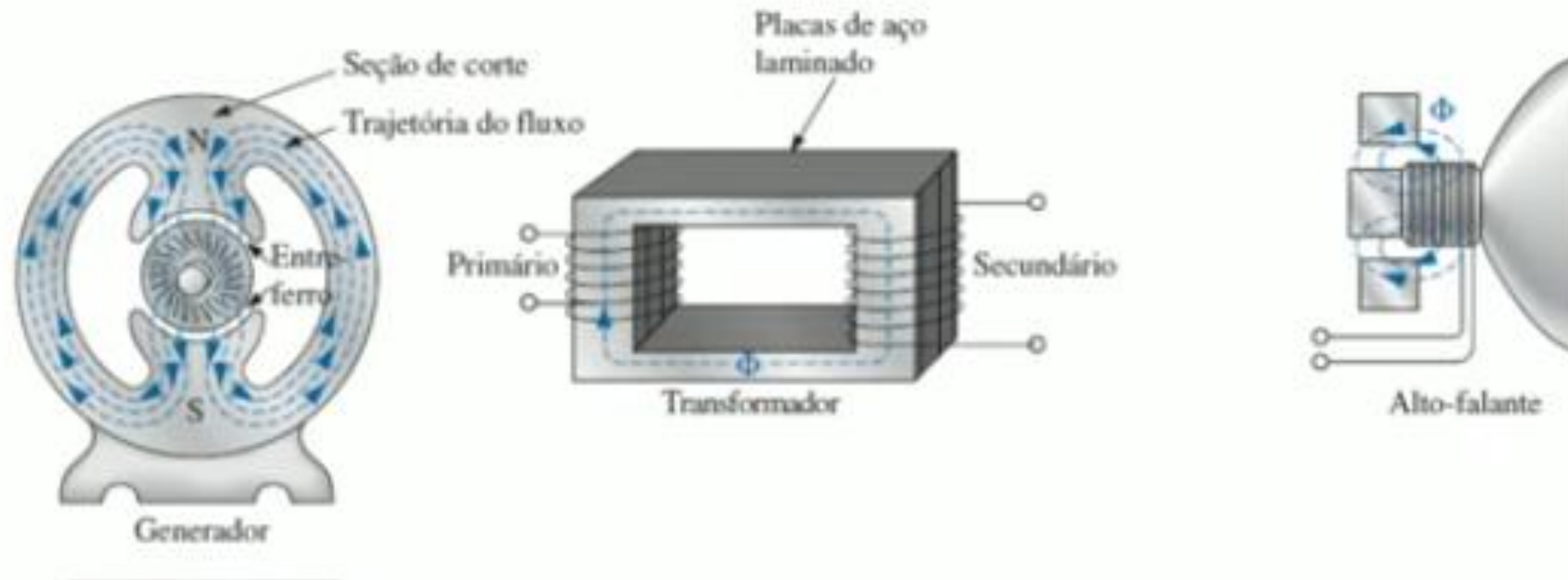


# CIRCUITOS MAGNÉTICOS

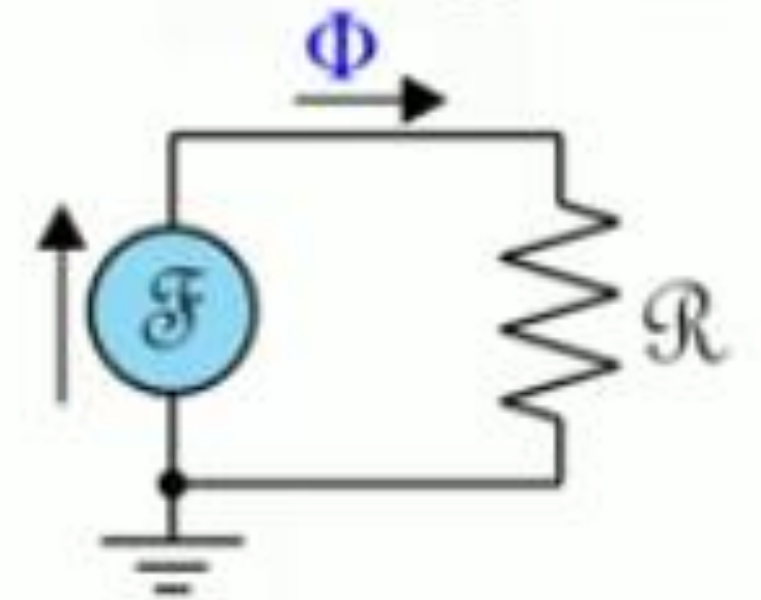
## ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

*Prof. Me. Roberta dos S. Celestino*

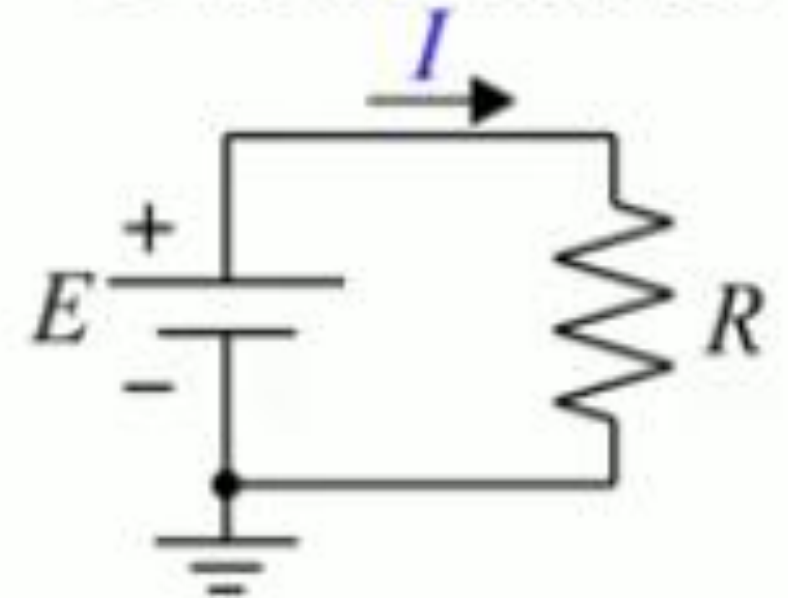
# Circuitos Magnéticos



## Circuito Magnético

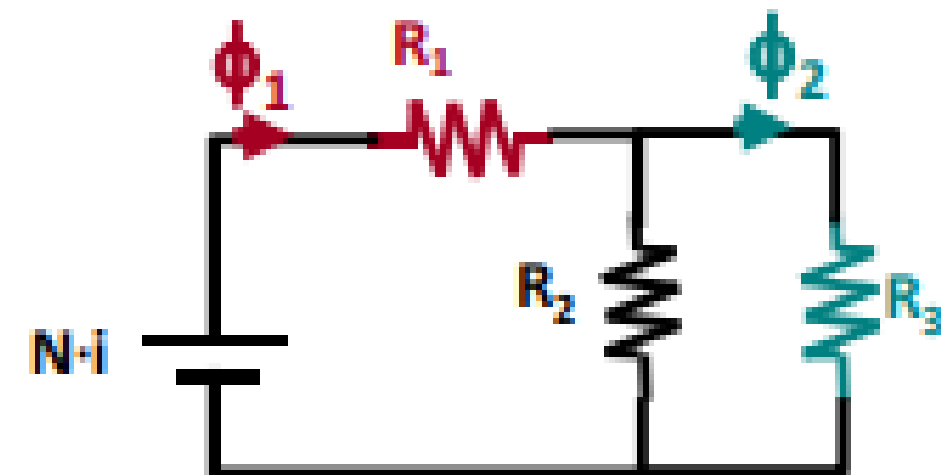
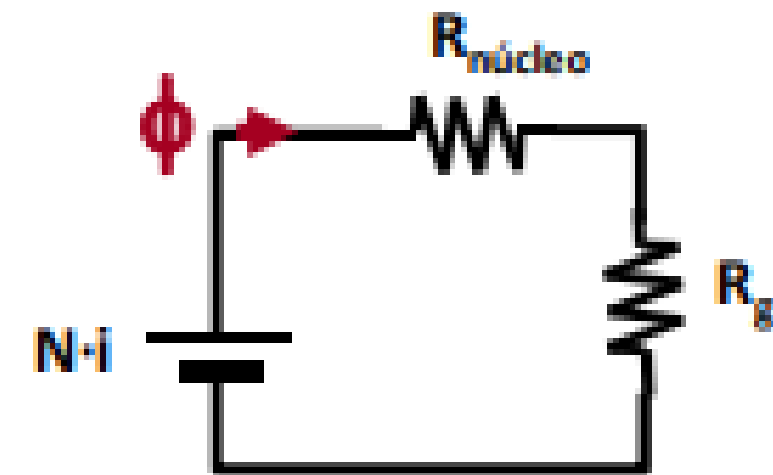
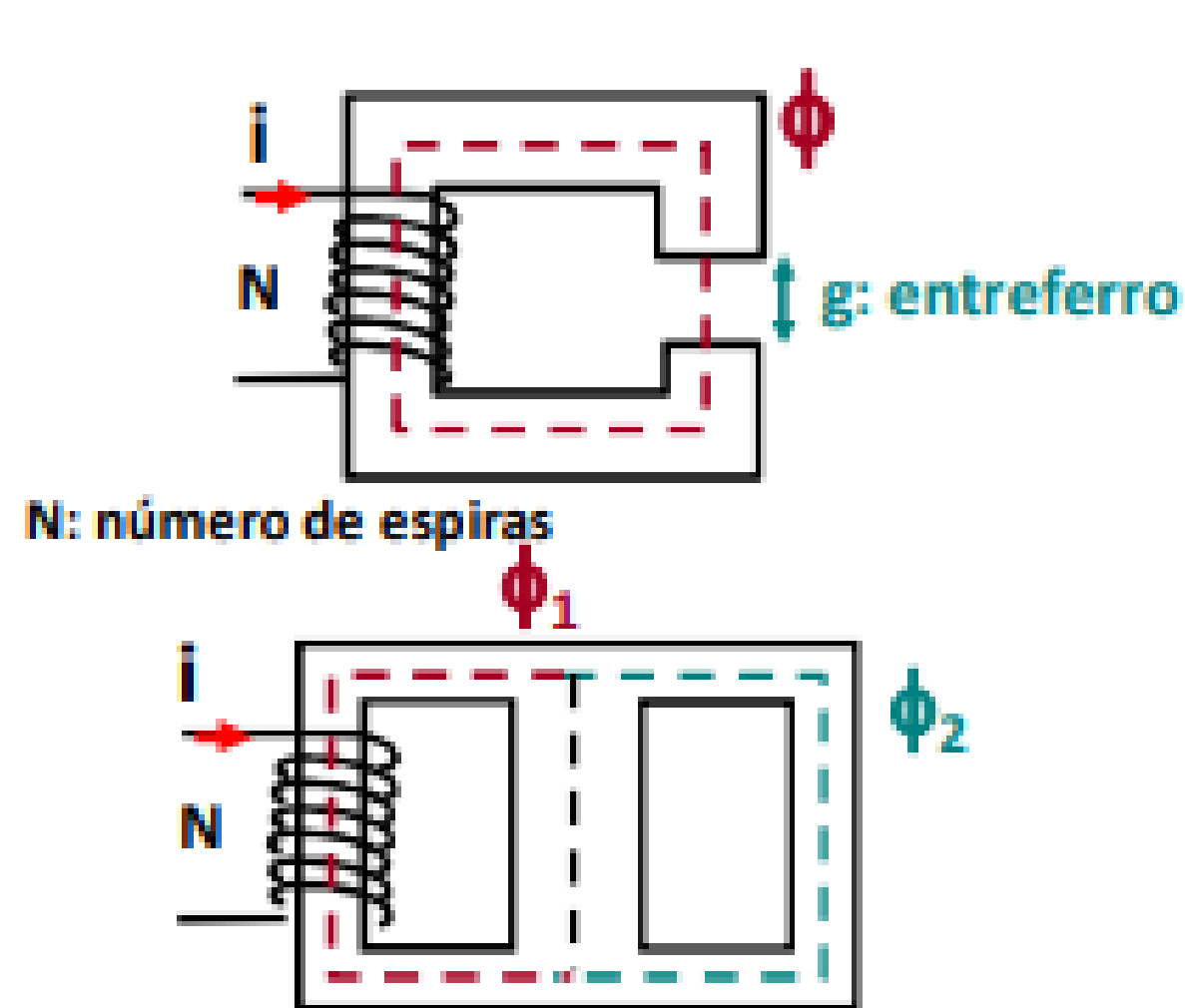


## Circuito Elétrico



# Circuitos magnéticos - Analogia

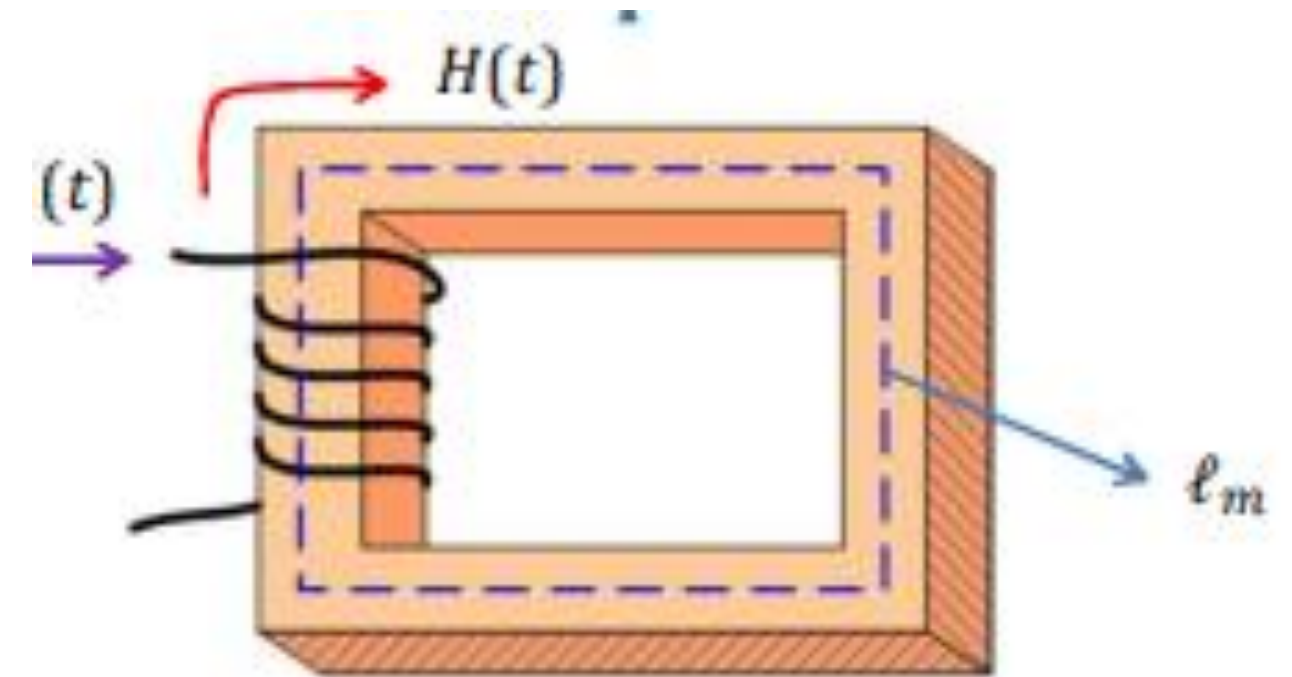
- Analogamente aos circuitos elétricos, os enrolamentos seriam como fontes, os fluxos
- magnéticos equivaleriam a correntes e os núcleos fariam o papel de condutores.



## Lei de Ampère

- O campo magnético ao longo de um caminho fechado no interior do núcleo ferromagnético pode ser definido como:

$$\oint H \cdot dl = \sum i$$



- Relaciona a intensidade de campo magnético  $H$  e a corrente  $i$ ;
- $i$  são as correntes envolvidas pela curva fechada;
- $dl$  é um vetor tangente a curva com comprimento infinitesimal.

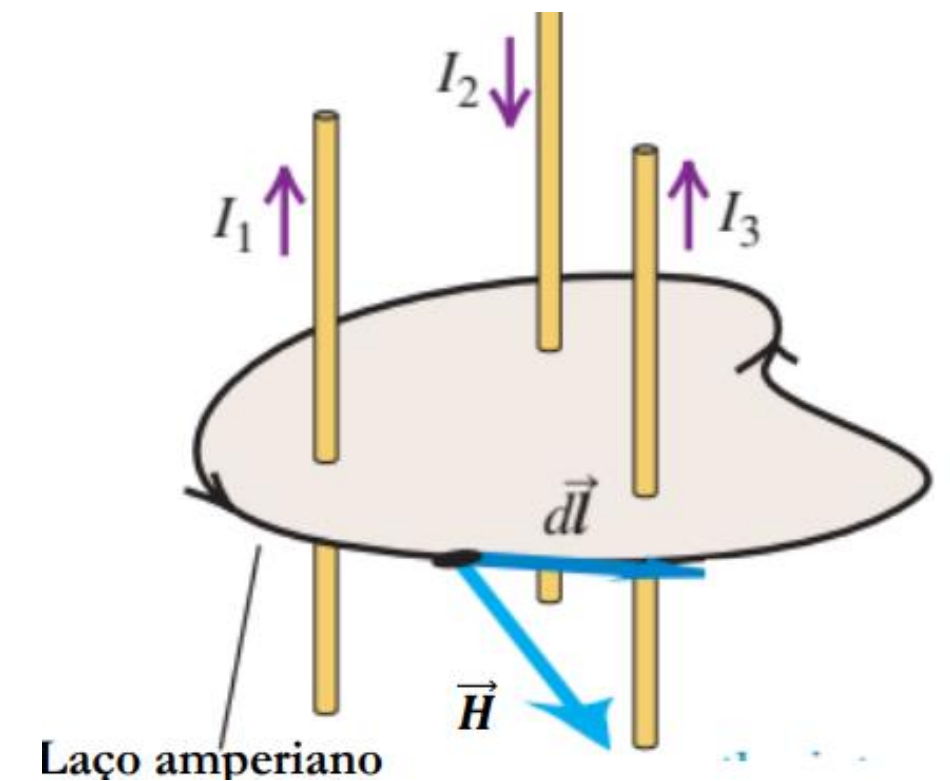
## Lei de Ampère

- Relaciona a intensidade de campo magnético  $H$  e a corrente  $i$ ;

$$\oint H \cdot dl = \sum i$$

- Para este exemplo, pode-se escrever que:

$$\oint H \cdot dl = I_1 - I_2 + I_3$$

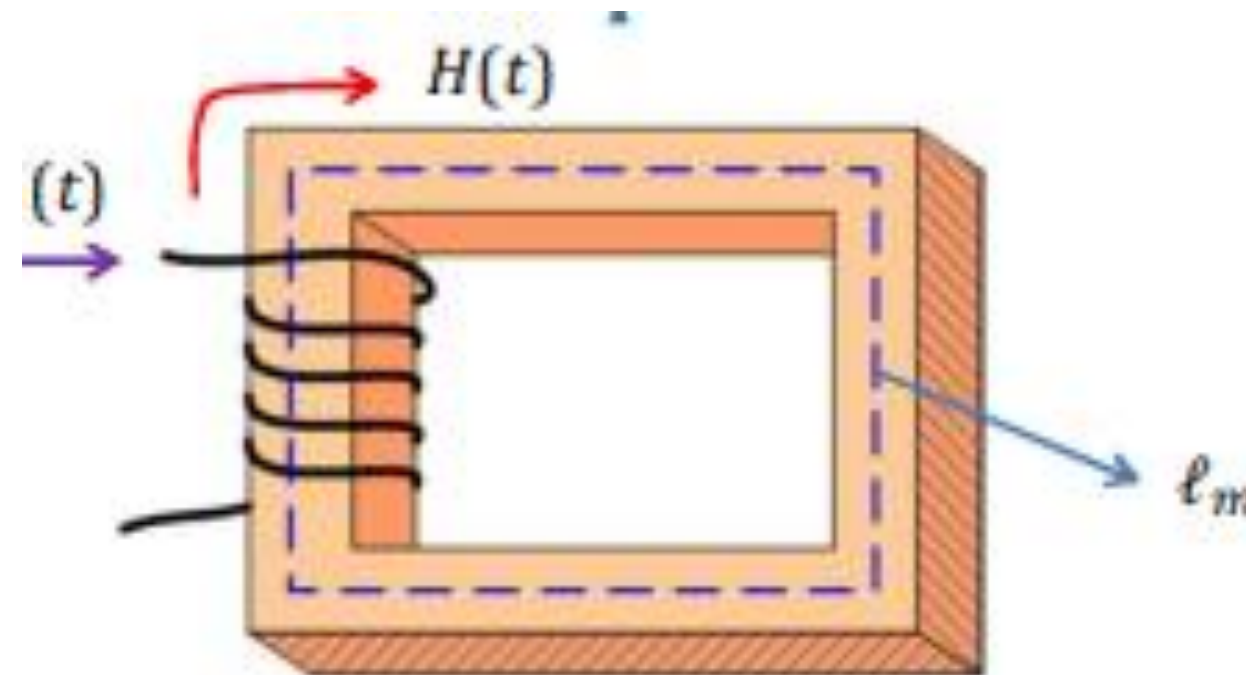


## Lei de Ampère

- Assumindo uma distribuição uniforme do campo magnético ao longo de um caminho
- médio:

$$H = \frac{Ni}{l}$$

- Onde  $i$  é a corrente elétrica,  $N$  é o número de espiras e  $l$  é o comprimento do circuito magnético.



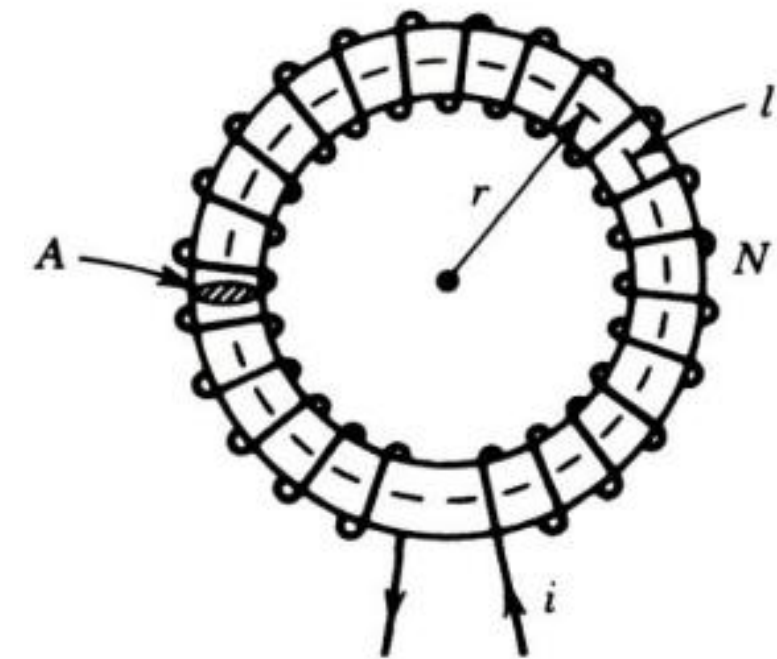
## Lei de Ampère

- Considere um núcleo magnético toroidal de permeabilidade magnética  $\mu$ , raio médio  $r$  e
- área de seção reta  $A$ . Uma bobina com  $N$  espiras construída utilizando-se este núcleo
- toroidal e é percorrida por uma corrente  $i$ .
- De acordo com a Lei de Ampère:

$$H = \frac{Ni}{l} \qquad H = \frac{N i}{2 \pi r}$$

- A densidade de fluxo é dada por:

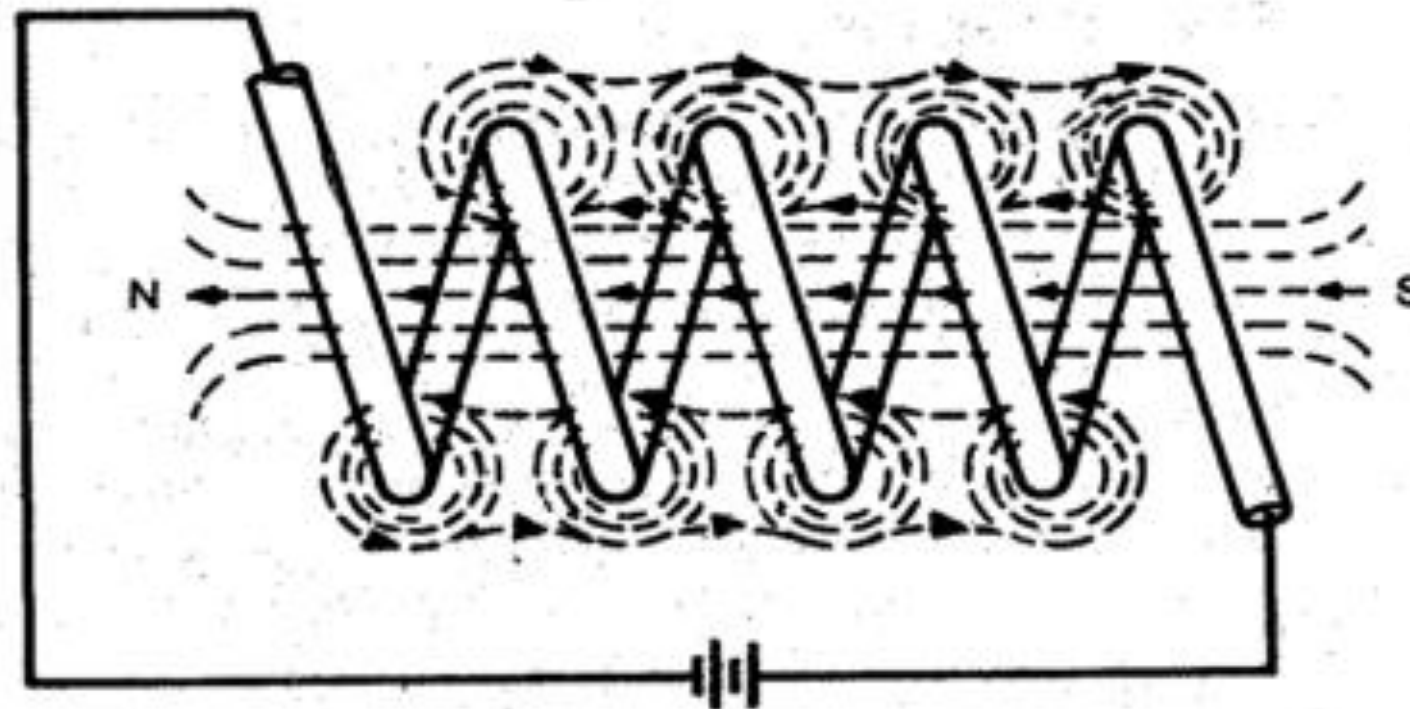
$$B = \mu H \Leftrightarrow B = \frac{\mu N i}{2 \pi r}$$





## Lei de Ampère

- A corrente que circula pelo condutor multiplicado pelo número de espiras do enrolamento definem a força magnetomotriz [Fmm] que é análoga à tensão ou força eletromotriz do circuito elétrico.
- $F_{mm} = N \cdot i$



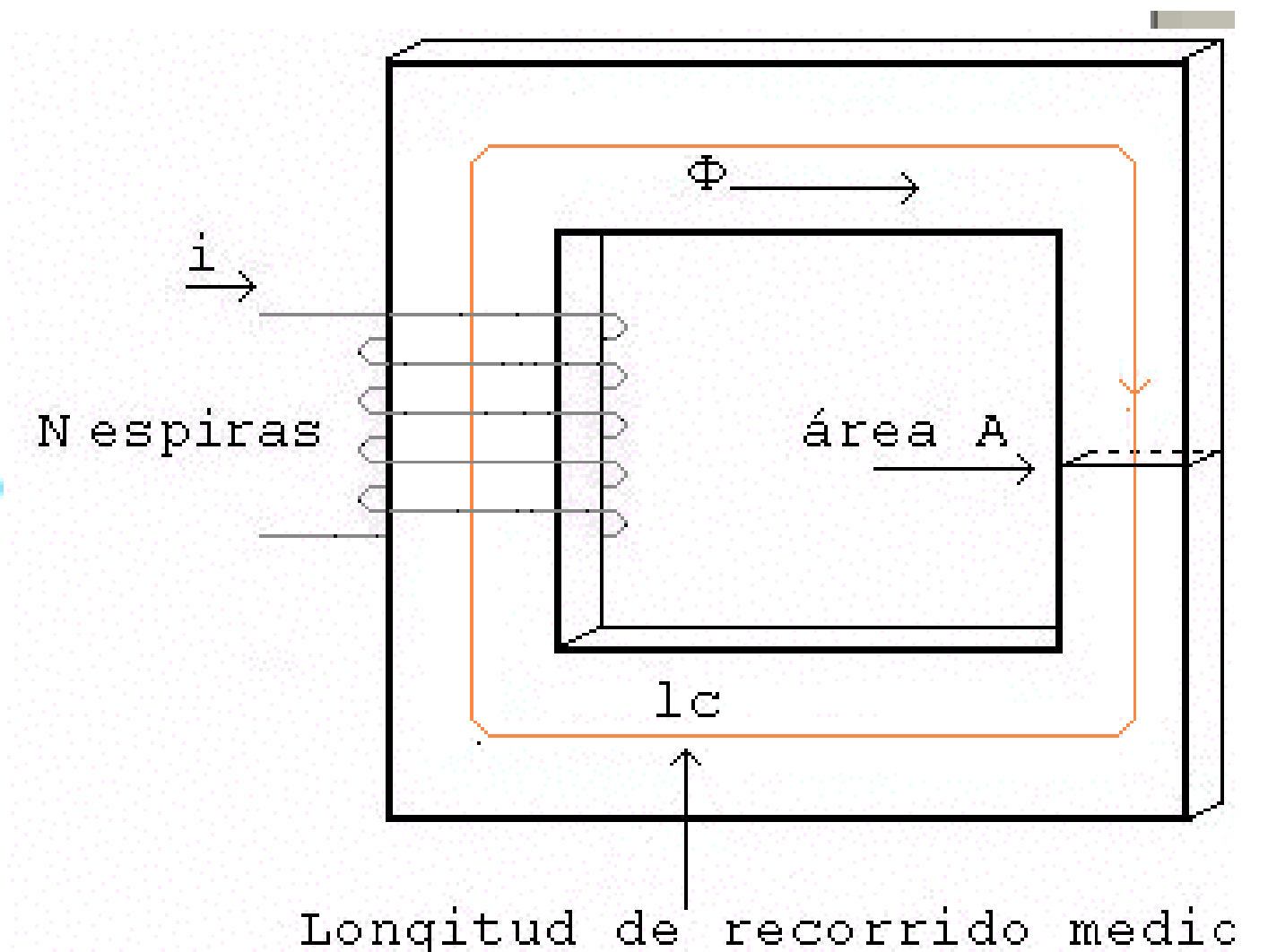


## Lei de Ampère

- A força magnetomotriz é o produto da corrente nas espiras pelo número de espiras que envolve o material magnético.
- Essa corrente produz uma intensidade de campo magnético que multiplicado pelo comprimento médio do circuito magnético também fornece a Fmm

$$F_{mm} = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni = H \cdot l_c$$

- Onde:
- $l_c$  = comprimento médio do circuito magnético [m].
- $F_{mm}$  – [Ampère espira – Ae]



## Densidade de fluxo

$$B = \mu H$$

$$H = \frac{B}{\mu}$$

$B(t)$  – densidade de fluxo magnético [Wb/m<sup>2</sup> ou Tesla];  
 $H(t)$  – intensidade de campo magnético [A/m];  
 $\mu$  – Permeabilidade magnética do meio;

$$\mathcal{F}_{mm} = Hl = \frac{B}{\mu} l$$

# Fluxo magnético

$$\phi = B A$$

$B(t)$  – densidade de fluxo magnético [Wb/m<sup>2</sup> ou Tesla];

$H(t)$  – intensidade de campo magnético [A/m];

$\Phi(t)$  – Fluxo magnético [Weber - Wb];

$A$  – área da seção reta [m<sup>2</sup>];

# Relutância magnética

- Onde  $\mathfrak{R}$  é denominada a relutância magnética e dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

$\mathfrak{R}$  - é a relutância (Ae/Wb)

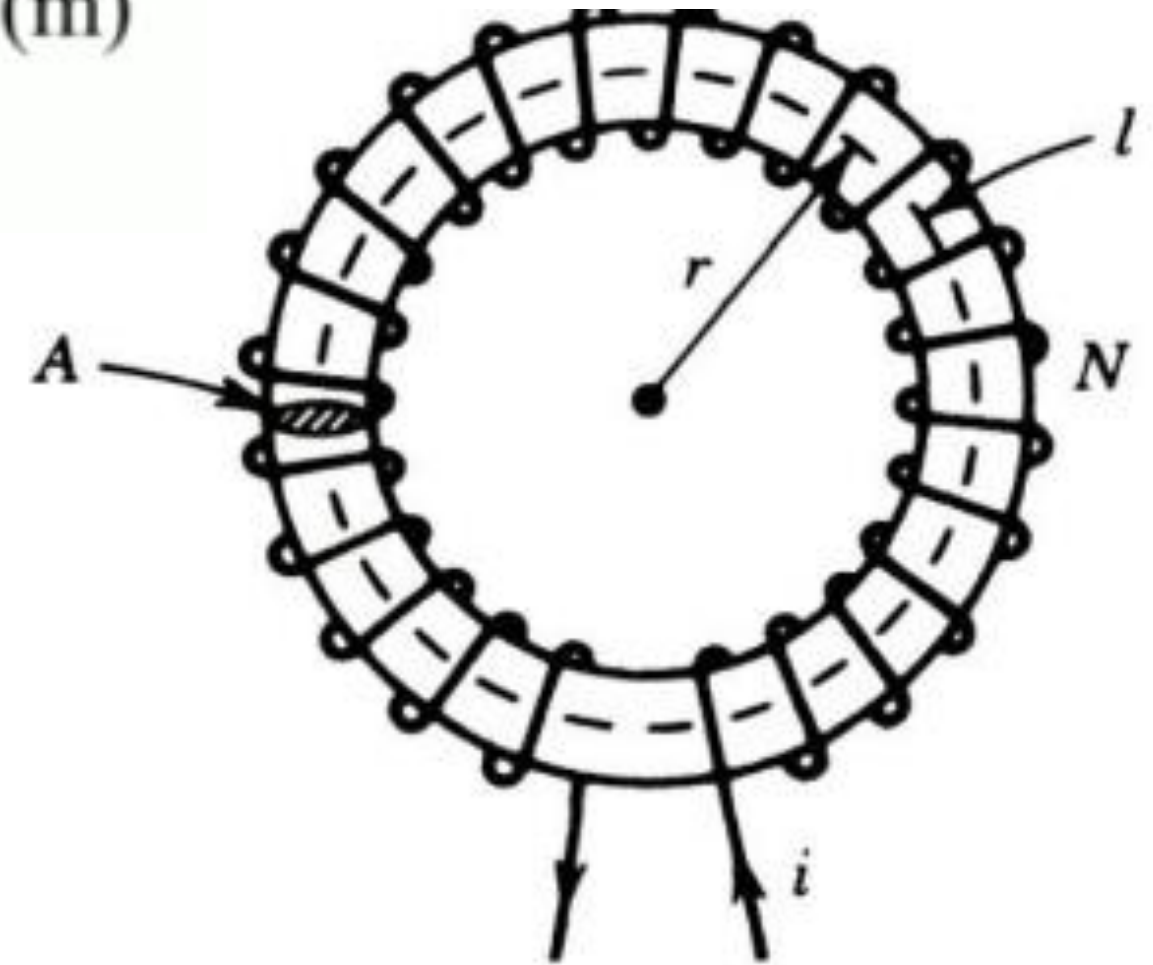
$l$  - é o comprimento do caminho magnético (m)

$A$  - é a área da seção transversal (m<sup>2</sup>)

- $\mu$  - Permeabilidade magnética do meio;
- $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$

**Permeabilidade magnética do ar**

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m}$$



## Relações fundamentais

- $B(t)$  – densidade de fluxo magnético [Tesla];
- $H(t)$  – intensidade de campo magnético [A/m];
- $\Phi(t)$  – Fluxo magnético [Weber];
- $W$  – energia armazenada no campo magnético;
- $\mu$  – Permeabilidade magnética do meio;

$$B(t) = \frac{\Phi(t)}{A_e}$$

$$B(t) = \mu H(t)$$

$$W = \frac{1}{2} \mu H(t)^2$$

$$F(t) = Ni = \Phi(t) \mathcal{R}$$

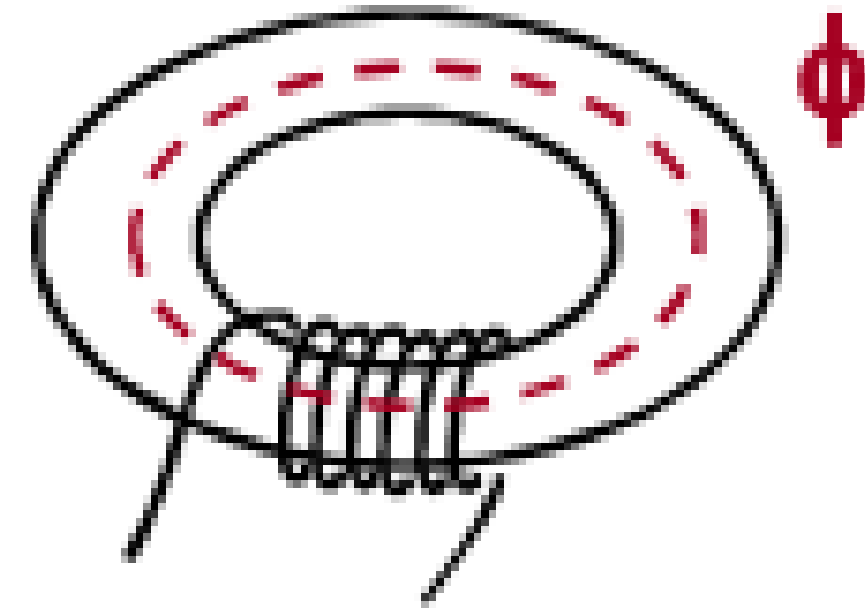


$$H(t) = \frac{B(t)}{\mu} = \frac{\Phi(t)}{\mu A_e}$$

$$F(t) = Ni = \oint H(t) d\ell = \Phi(t) \oint \frac{d\ell}{\mu A_e}$$

Relutância

$$\mathcal{R} = \oint \frac{d\ell}{\mu A_e} = \frac{\ell_m}{\mu A_e}$$



## Equações básicas dos circuitos magnéticos

- O termo  $F = Ni$  é denominado força magnetomotriz.

$$Ni = \mathfrak{R}\phi$$

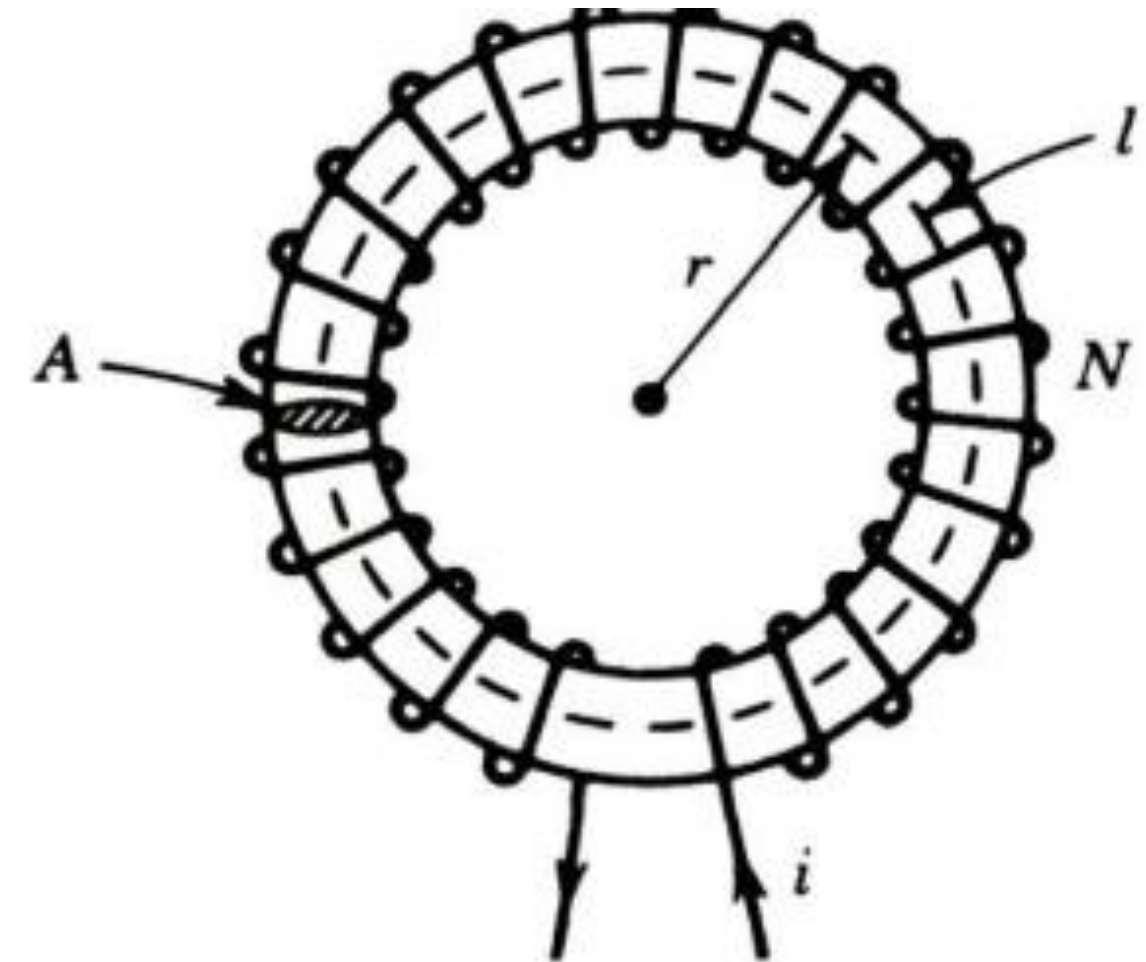
- Note a semelhança desta equação com a primeira Lei de Ohm:

$$V = Ri$$

- Note a semelhança da relutância magnética com a resistência elétrica (segunda lei de Ohm):

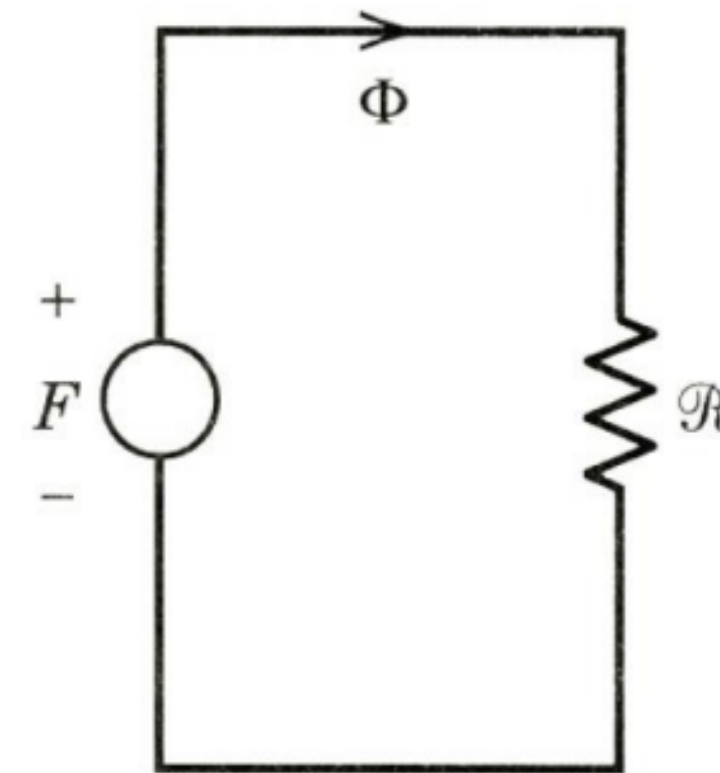
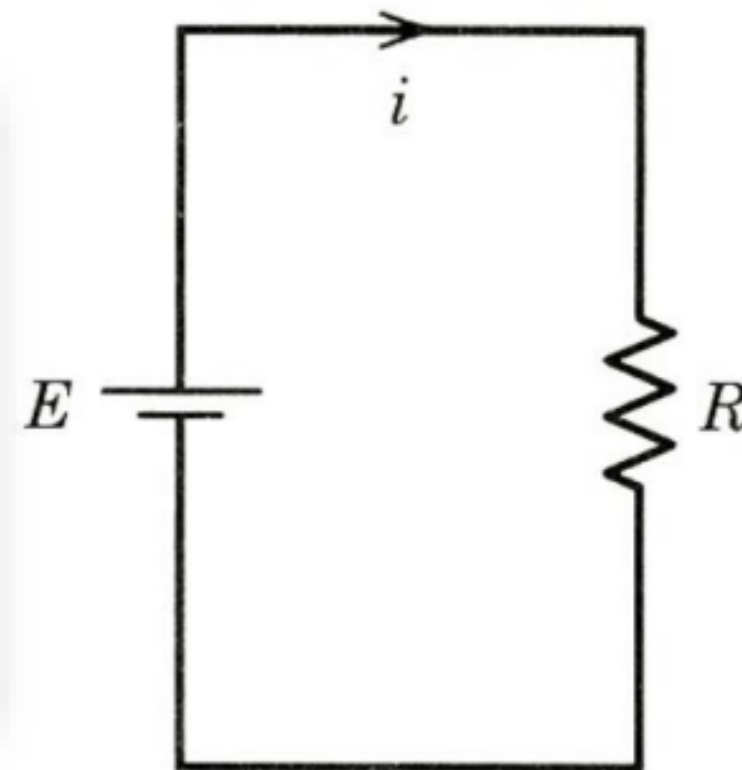
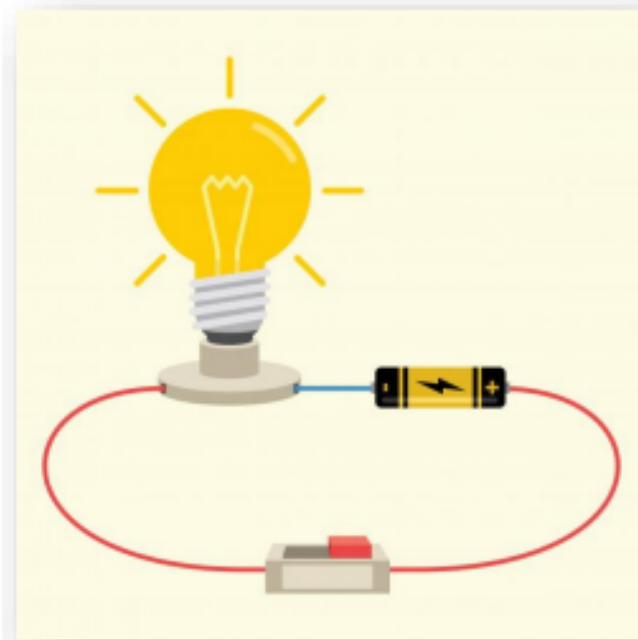
$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

$$R = \frac{l}{\sigma A}$$



# Analogia entre circuitos elétricos e magnéticos

Circuitos Elétricos	Circuitos magnéticos
Força eletromotriz $V$	Força magnetomotriz $\mathbf{F} = N\mathbf{i}$
Corrente Elétrica $i$	Fluxo magnético $\phi$
Resistência Elétrica $R$	Relutância Magnética $\mathfrak{R}$

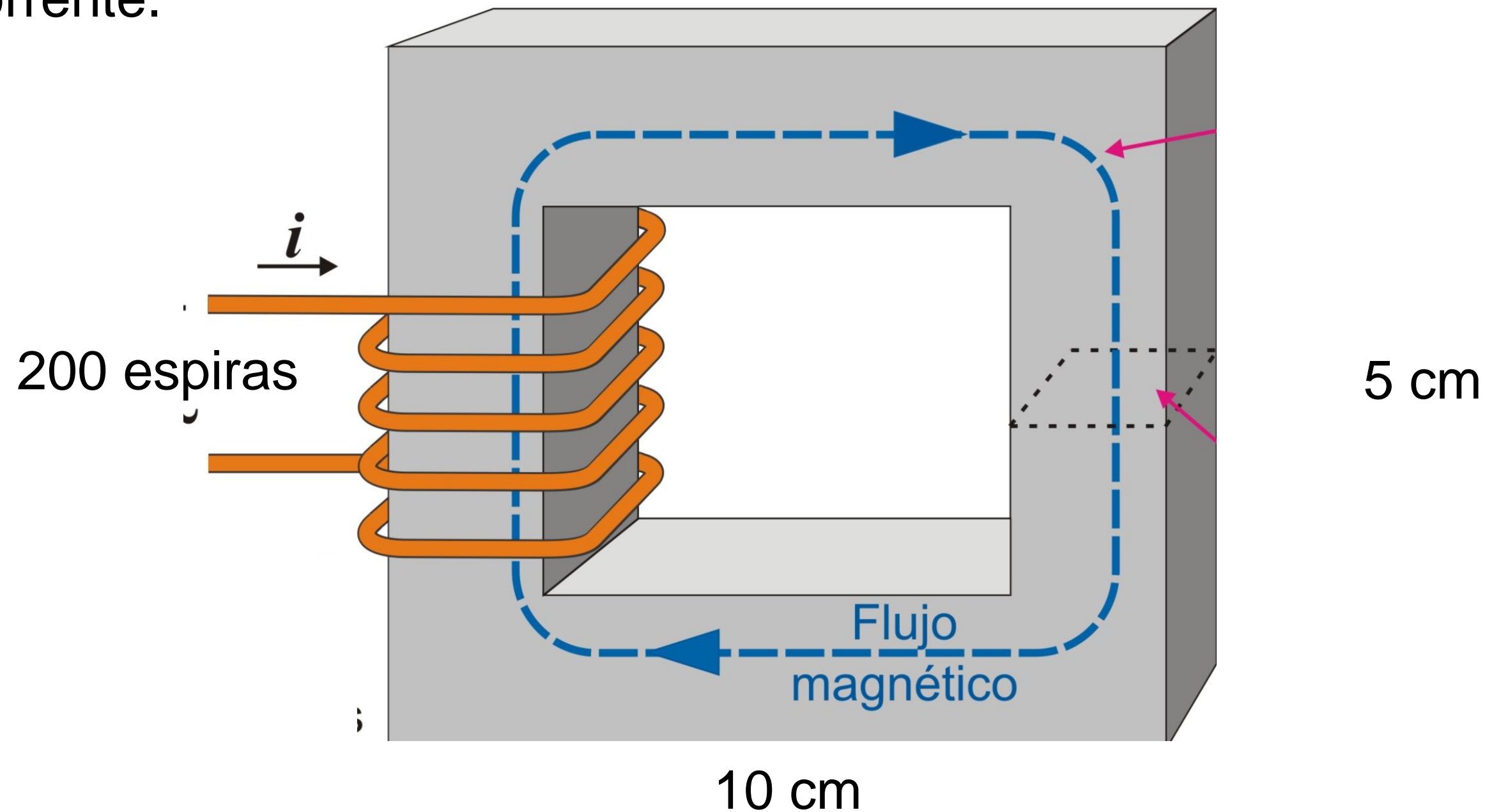


<https://www.magmattec.com.br/>



## Exemplo

- Uma bobina está enrolada em um núcleo com  $4 \text{ cm}^2$  de seção reta, material com permeabilidade relativa de 80000 e densidade de fluxo 1 T. Calcule a relutância, o fluxo e a corrente.



## Exercício

- A profundidade do núcleo é de 5 cm. Encontre o valor da corrente que produzirá um fluxo de 0,005 Wb. Com essa corrente, qual a densidade de fluxo no lado superior? E no lado direito do núcleo? Sabendo que a permeabilidade relativa é 800.

