

# Máquinas Elétricas

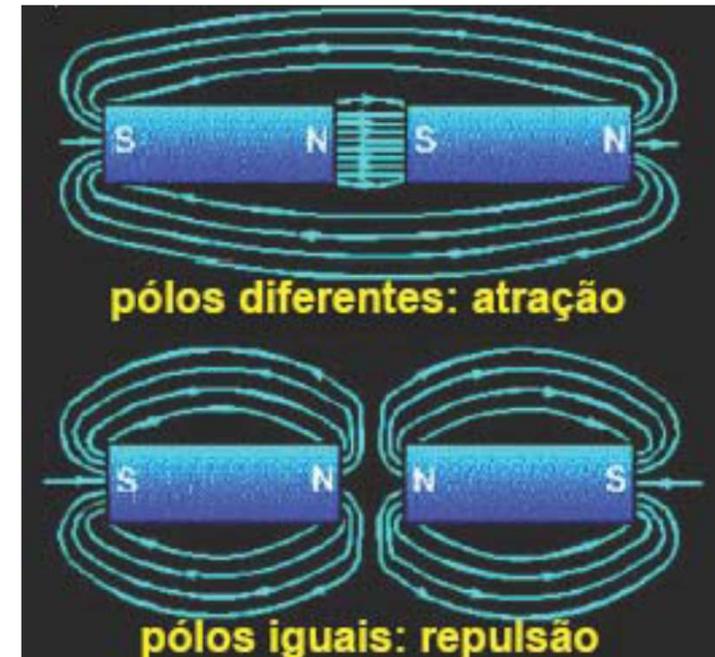
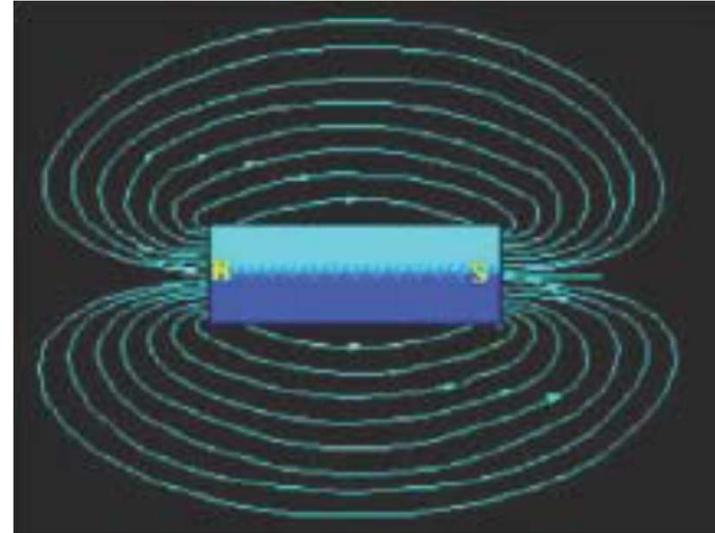
Odailson Cavalcante de Oliveira

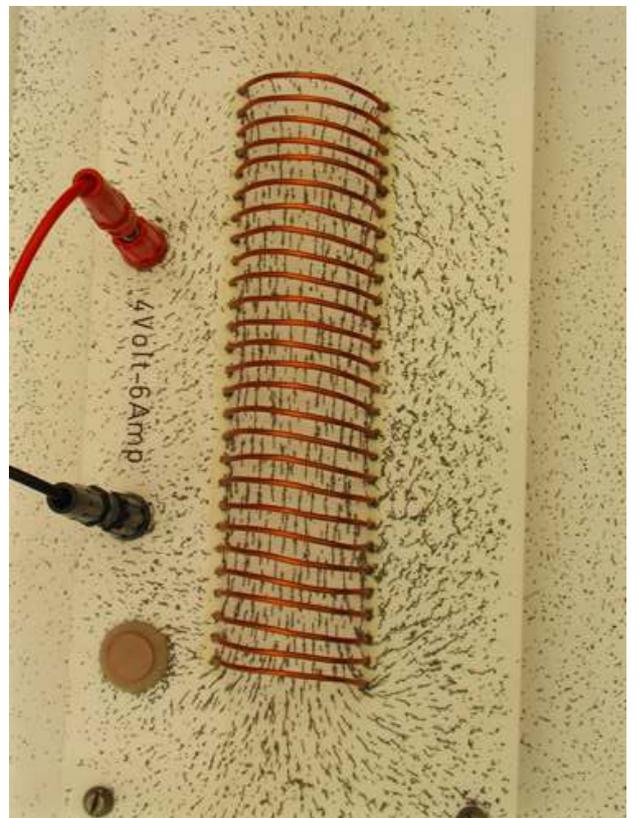
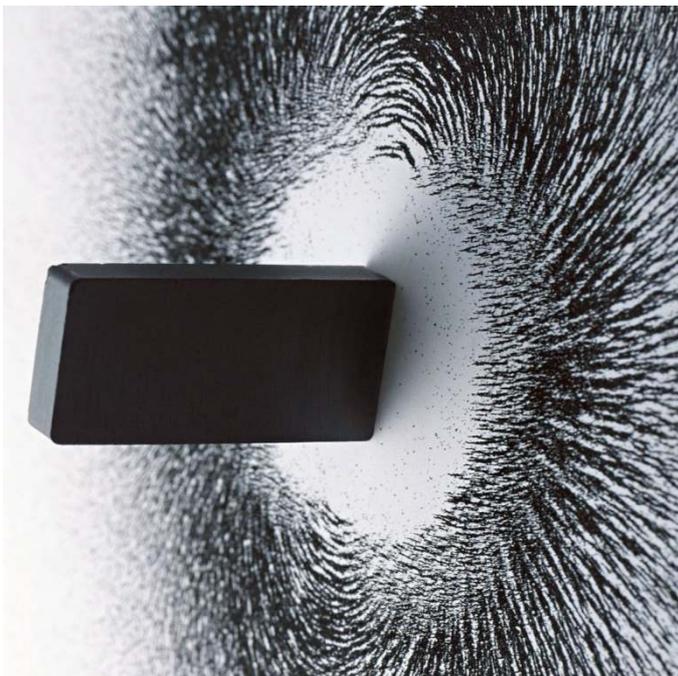
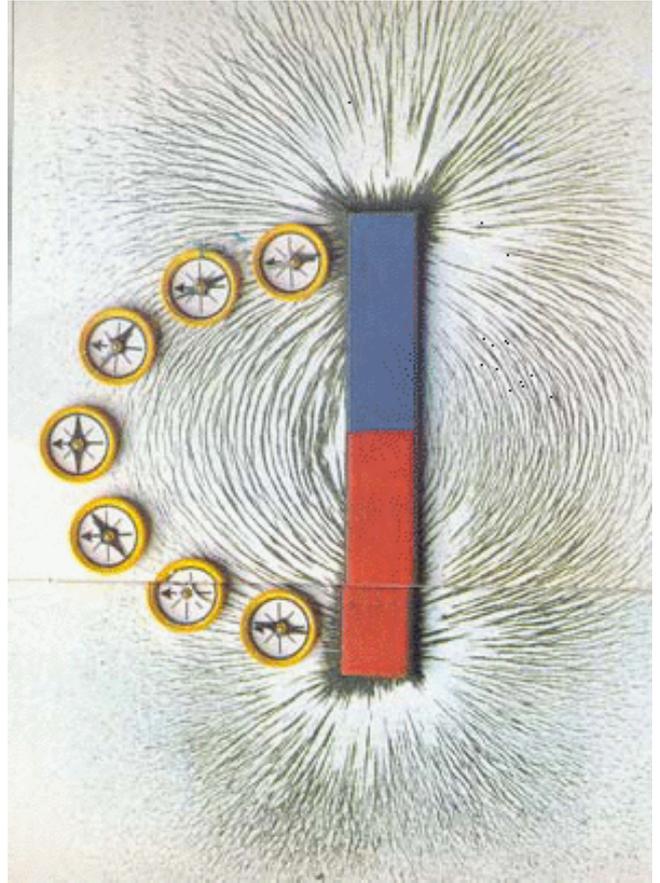
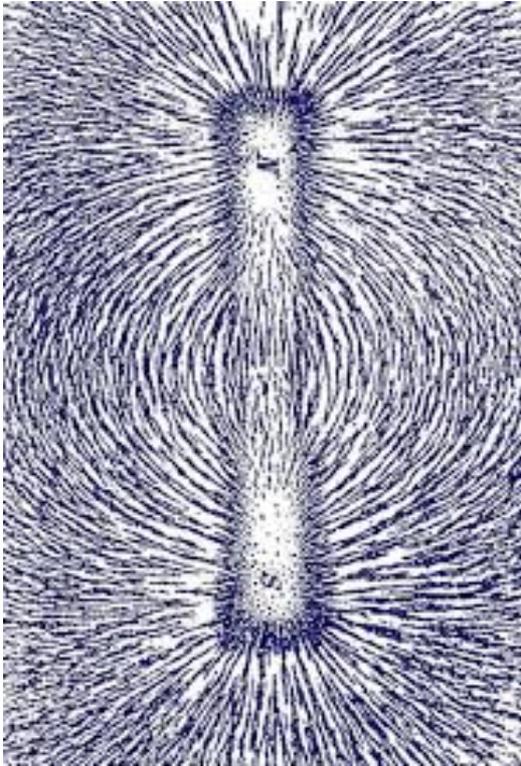
# Tópicos

- Campo Magnético
- Fluxo magnético
- Permeabilidade Magnética
- Relutância
- Experiência de Oersted
- Densidade do Campo Magnético
- Solenoide
- Vetor Força Magnetizante
- Força Magneto Motriz
- Saturação Magnética
- Histerese Magnética
- Força Eletromagnética
- Indução Eletromagnética
- Força Eletromotriz
- Correntes parasitas ou de Foucault
- Freio de Foucault

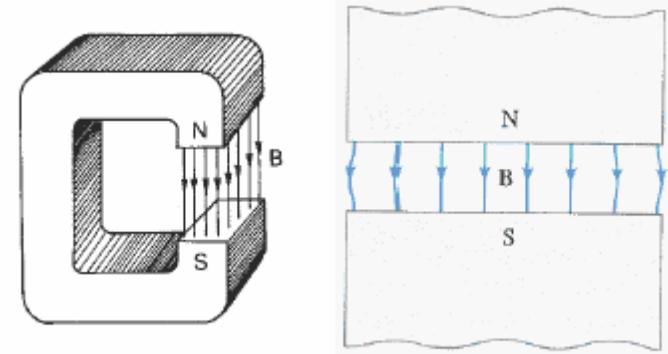
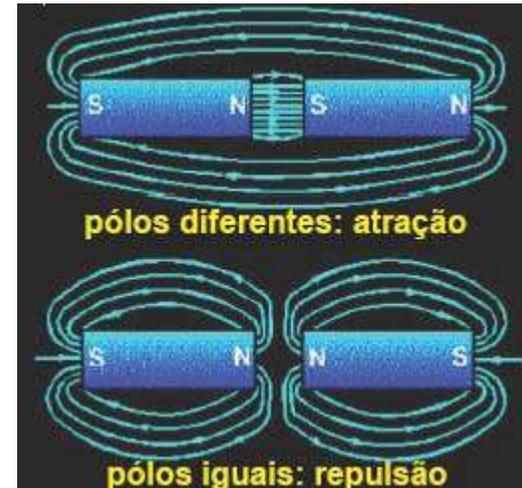
# Campo Magnético

- **Campo magnético** é a região ao redor de um ímã, na qual ocorre uma **força magnética** de atração ou de repulsão.
- Linhas de campo magnético também (linhas de indução magnética ou linhas de fluxo magnético) que são linhas envoltórias imaginárias fechadas, que saem do pólo norte e entram no pólo sul.
- [Vídeo Ferro Fluido](#)



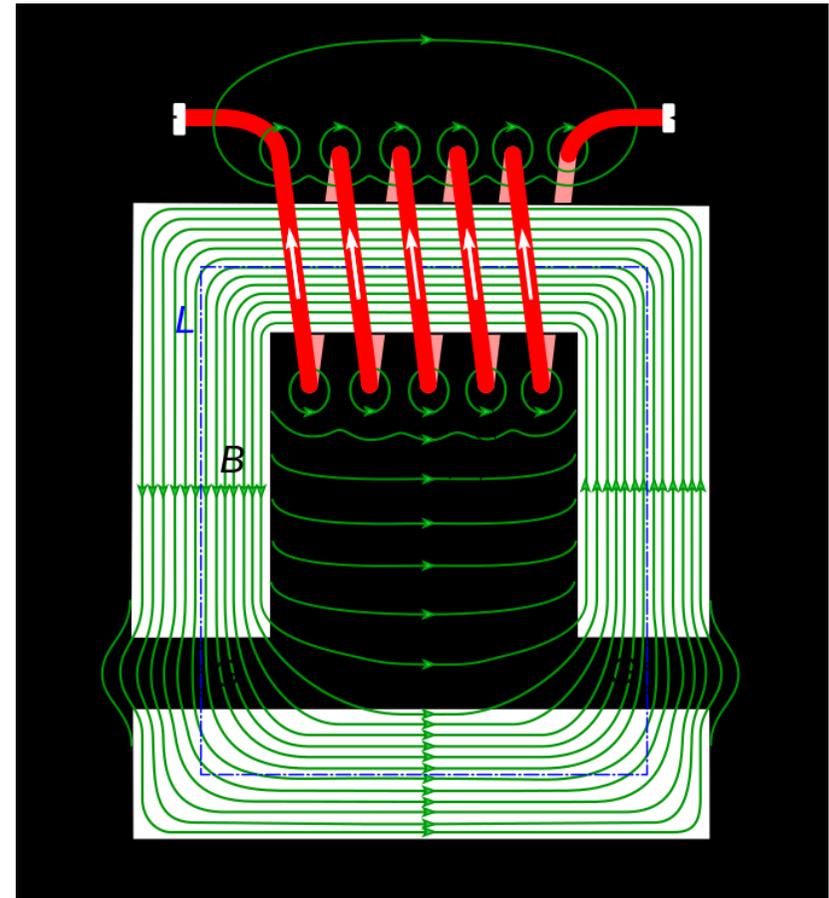


- As características das linhas de campo magnético:
  - são sempre linhas fechadas: saem e voltam a um mesmo ponto e nunca se cruzam;
  - fora do ímã, as linhas saem do pólo norte e se dirigem para o pólo sul;
  - dentro do ímã, as linhas são orientadas do pólo sul para o pólo norte;
  - saem e entram na direção perpendicular às superfícies dos pólos;
  - nos pólos a concentração das linhas é maior: quanto maior concentração de linhas, mais intenso será o campo magnético numa dada região.



# Espraiamento

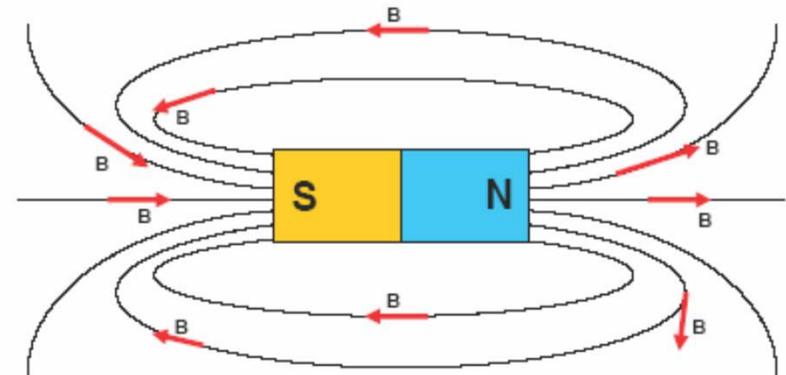
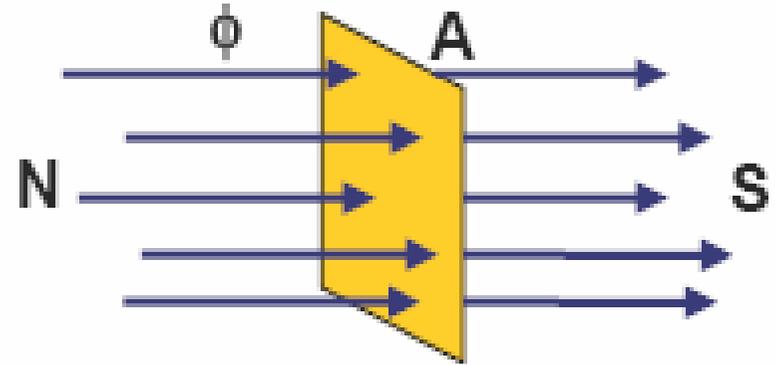
- Na prática, dificilmente encontra-se um campo magnético perfeitamente uniforme. Nas bordas de um elemento magnético há sempre algumas linhas de campo que não são paralelas às outras. Estas distorções são chamadas de **espraiamento**



# Fluxo magnético

- O **fluxo magnético** simbolizado por  $\phi$ , é definido como a quantidade de linhas de campo que atingem perpendicularmente uma dada área. [**Weber (Wb)**]
- $1Wb = 1.10^8 \text{ linhas de campo}$
- $B$ : densidade fluxo magnético, Tesla [ $T$ ]
- $\phi$ : fluxo magnético, Weber [ $Wb$ ]
- $A$ : área da seção perpendicular perpendicular ao fluxo magnético, metro quadrado [ $m^2$ ]
- $1T = 1Wb/m^2$

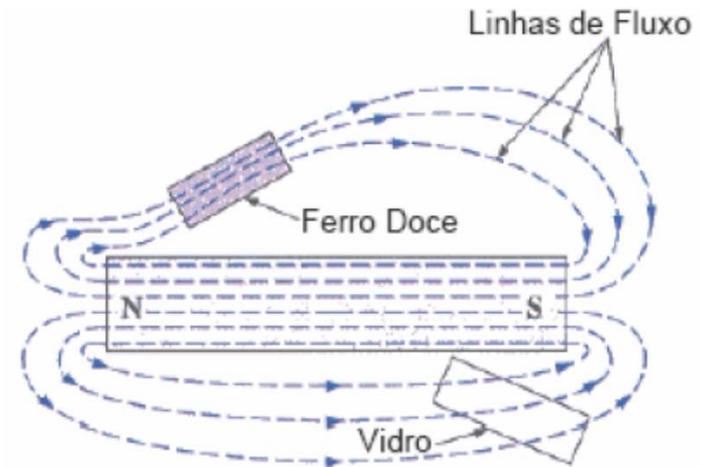
$$B = \frac{\phi}{A}$$



# Permeabilidade Magnética

- A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) mede a facilidade com que as linhas de campo podem atravessar um dado material.
- Materiais diamagnéticos: Aqueles que têm a permeabilidade menor que a do vácuo.
- Materiais paramagnéticos têm a permeabilidade um pouco maior que a do vácuo são chamados
- Materiais ferromagnéticos: ferro, níquel, aço, cobalto e ligas desses materiais têm permeabilidade de centenas e até milhares de vezes maiores que o vácuo.
- Permeabilidade relativa ( $\mu_r$ )

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0}$$



Permeabilidade do vácuo

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{Wb}{A \cdot m} \right]$$

$\mu_r$ : permeabilidade relativa de um material (adimensional)

$\mu_m$ : permeabilidade de um dado material

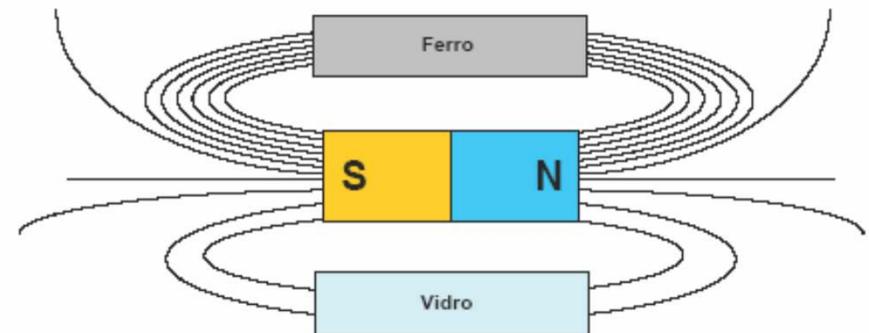
$\mu_0$ : permeabilidade do vácuo

# Relutância

- A **relutância magnética** é a medida da oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético.

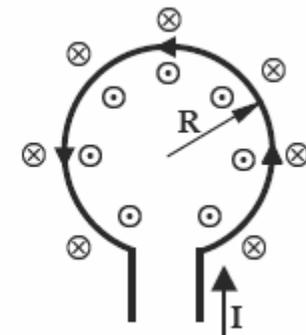
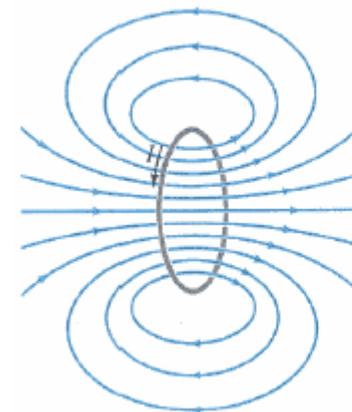
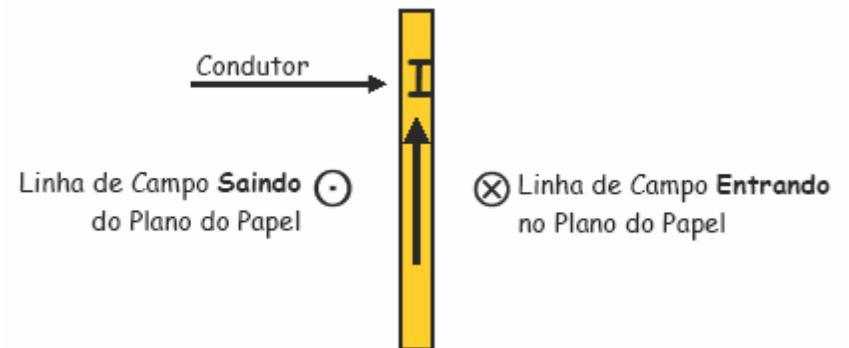
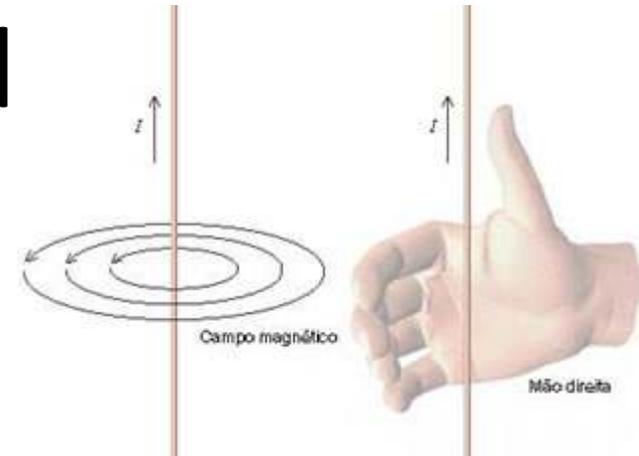
$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

- $\mathfrak{R}$ : relutância magnética,  $[Ae/Wb]$ ;
- $l$ : comprimento médio do caminho magnético das linhas de campo no meio,  $[m]$ ;
- $\mu$ : permeabilidade magnética do meio,  $[Wb/A.m]$ ;
- $A$ : área da seção transversal,  $[m^2]$ .



# Experiência de Oersted

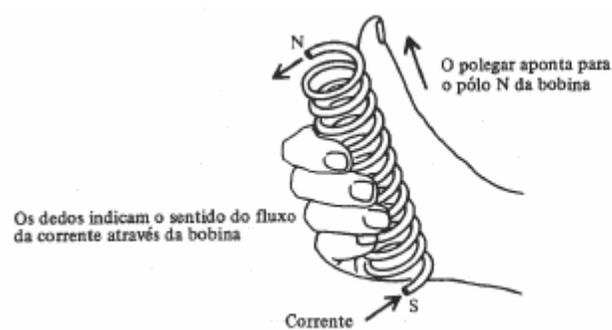
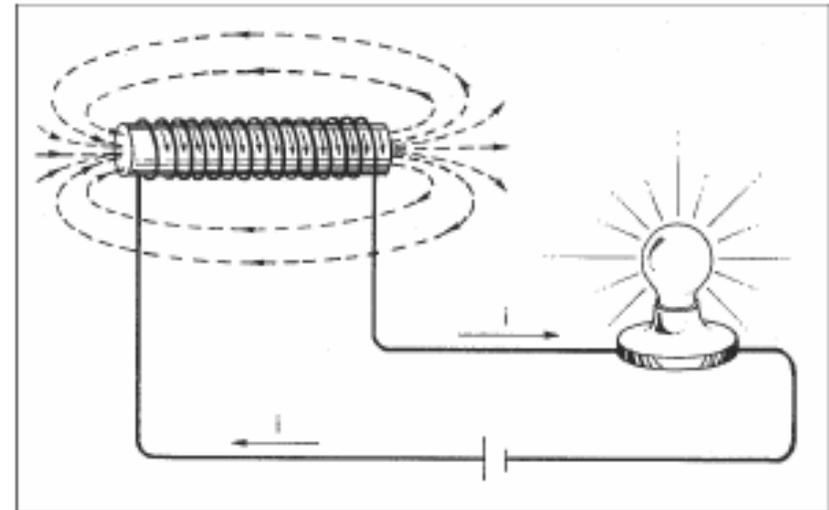
- Campo magnético criado por uma corrente elétrica
- Vídeo: experiência de Oersted
  - [..\eletricidade\instrumental\videos\Magnetic Field of a Coil of Wire.avi](#)
- A Regra de Ampère, também chamada de Regra da Mão Direita é usada para determinar o sentido das linhas do campo magnético, considerando-se o sentido convencional da corrente elétrica.



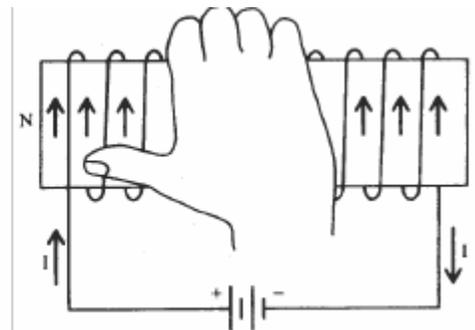
# Solenóide

- A densidade do campo magnético (densidade de fluxo magnético) no centro de um solenóide:

$$B = \frac{\mu NI}{l}$$



## Eletroímã



# Vetor Força Magnetizante

- **Vetor Campo Magnético Indutor ou Vetor Força Magnetizante ( $H$ )** ao campo magnético induzido (gerado) pela corrente elétrica na bobina, independentemente da permeabilidade magnética do material do núcleo (meio).

- $$B = \frac{\mu NI}{l} \Rightarrow \frac{B}{\mu} = \frac{NI}{l} \Rightarrow \frac{B}{\mu} = H$$

- $$H = \frac{NI}{l} = \mu B$$

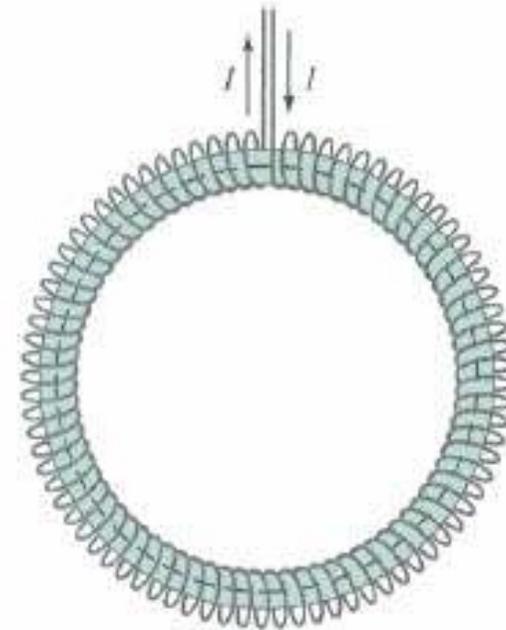
- $$H = \mu B$$

- $H$ : campo magnético indutor, [ $Ae/m$ ];

- $N$ : número de espiras do solenóide;

- $I$ : intensidade de corrente no condutor, [ $A$ ];

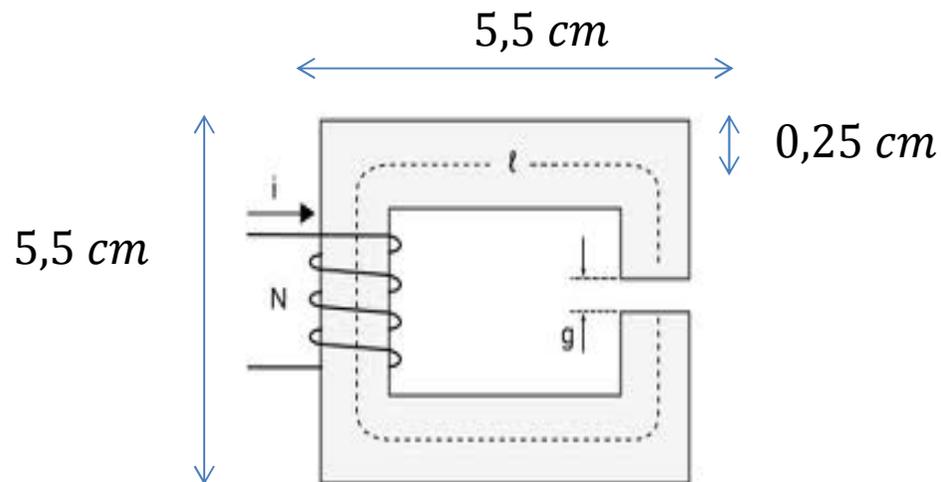
- $l$ : comprimento do núcleo magnético, [ $m$ ].



A Densidade de Fluxo Magnético  $B$  é o efeito da Força Magnetizante  $H$  num dado meio  $\mu$ .

# Exercício

- Calcule **Vetor Força Magnetizante** no núcleo de ferro de um solenoide, conforme a figura abaixo. Sabendo que a corrente que circula o solenoide é  $2A$ , e  $g = 0,25cm$ ,  $N = 200e$ .



# Resposta

- Calcula-se o  $l$  somando os comprimentos de um linha que passa no centro de cada lado do núcleo.

$$- l = 5 + 5 + 5 + 4,75 = 19,75 \text{ cm} = 0,1975\text{m}$$

- Calcula-se a  $H$ ,

$$- H = \frac{NI}{l} = \frac{200.2}{0,1975} = 2025,31\text{Ae/m}$$

# Força Magneto Motriz

- Força Magneto Motriz ( $fmm$ )

$$- fmm = NI \quad Hl = NI$$

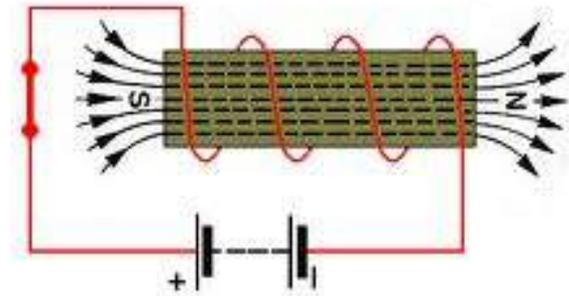
$$- fmm = Hl$$

- Relutância:  $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$

- Intensidade de Campo:  $H = \mu B$

- Fluxo magnético:  $\phi = BA$

- $fmm = \frac{\phi}{\mathfrak{R}}$



# Exercícios

1- Calcule a  $fmm$  de uma bobina com 20 espiras e ligada numa fonte cuja corrente de saída é 2 A.

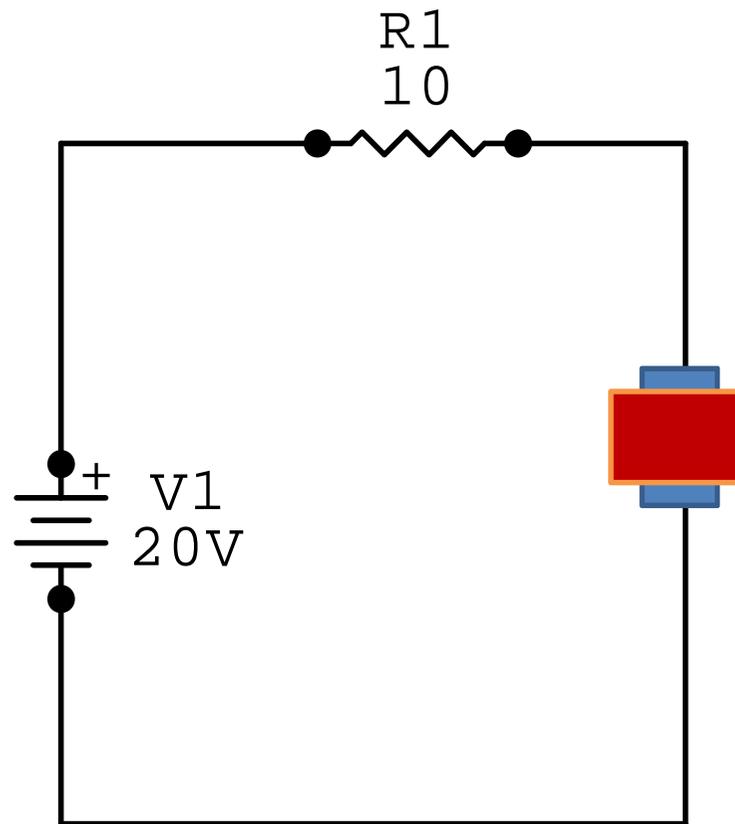
2- Calcule a  $fmm$  da bobina com 25 espiras ligada em série com o resistor de 10 Ohms e uma fonte de 20 V, considerando a resistência da bobina desprezível.

# Respostas

1-  $F = NI = 20 \cdot 2 = 40Ae$

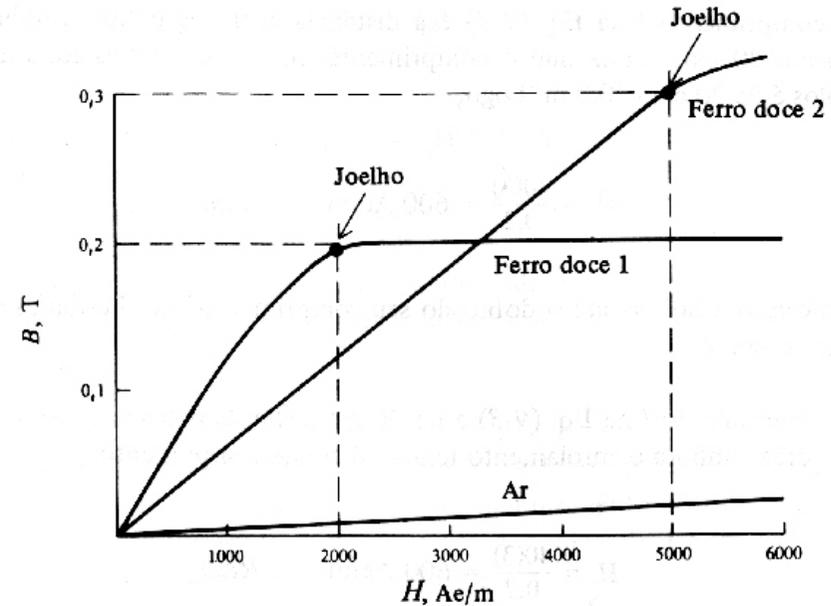
2  $i = 20/10 = 2A$

$F = 2 \cdot 25 = 50Ae$



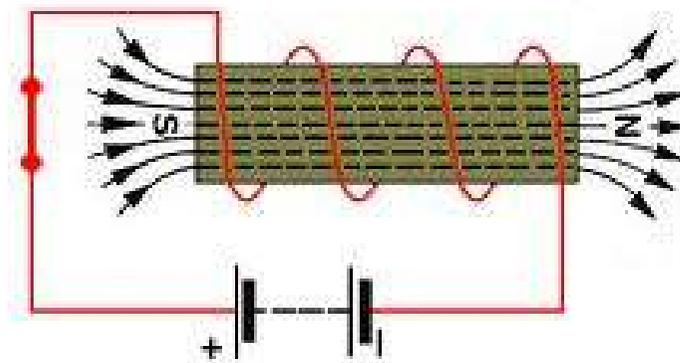
# Saturação Magnética:

- Aumentando-se a corrente, aumenta-se a *fmm*, assim maior se torna a magnetização do núcleo até atingir um nível máximo de magnetização (Joelho), nesse ponto não importa o quanto aumentamos a *fmm*, a magnetização não vai aumentar.



$$\mu \text{ para o ferro doce número 1} = \frac{B}{H} = \frac{0,2}{2000} = 1 \times 10^{-4} (\text{T} \cdot \text{m}) / \text{Ae}$$

$$\mu \text{ para o ferro doce número 2} = \frac{B}{H} = \frac{0,3}{5000} = 6 \times 10^{-5} (\text{T} \cdot \text{m}) / \text{Ae}$$



# Histerese Magnética

- Os materiais magnéticos podem manter-se magnetizados mesmo depois de retirarmos a *fmm* que o magnetizou.
- Para remover a magnetização, ou imantação, deve-se aplicar uma nova *fmm* contrária e com intensidade suficiente a que o magnetizou.
  - $B_r$  é o fluxo residual após o campo  $H$  ser zerado.
  - $H_c$  é a intensidade de campo que se deve aplicar para eliminar o fluxo residual.

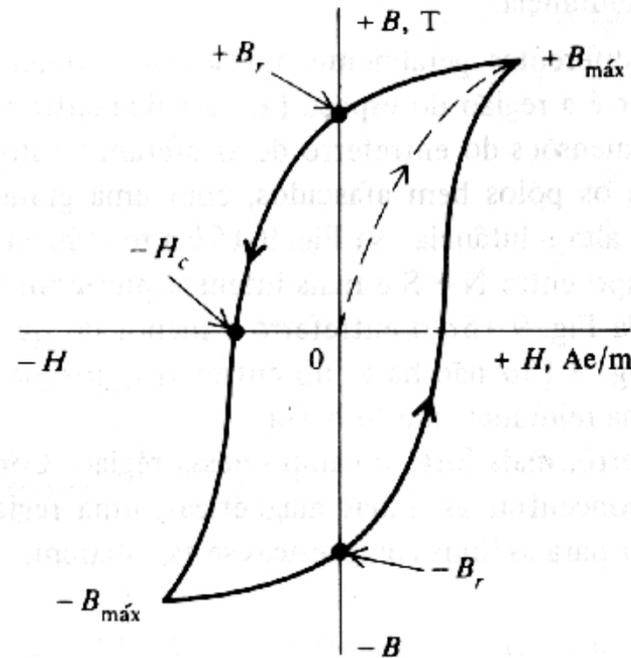
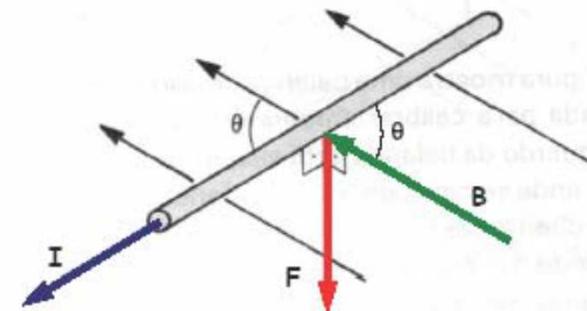
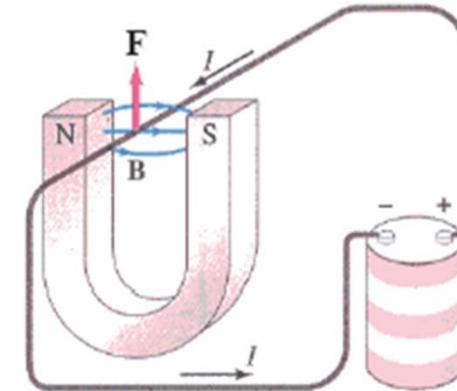
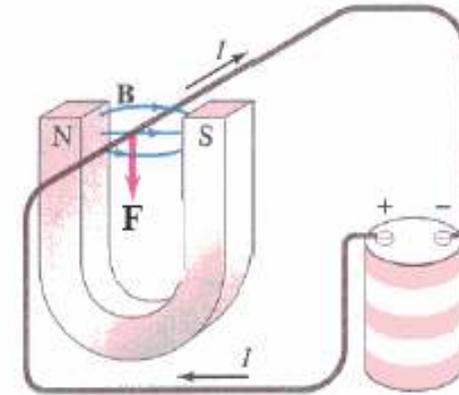


Fig. 9-13 Curva de histerese para materiais magnéticos

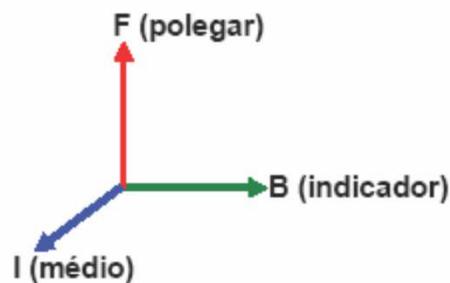
# Força Eletromagnética

- **força eletromagnética:** surge quando um condutor percorrido por corrente elétrica está no interior de um campo magnético.
  - $F = I.l.\text{sen}\theta$
- $F$ : força eletromagnética, [N];
- $I$ : corrente elétrica, [A];
- $l$ : comprimento ativo do condutor sob efeito do campo magnético, [m];
- $B$ : densidade de campo magnético ou densidade de fluxo magnético [T];
- $\theta$ : ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor [ $^{\circ}$  ou rad].

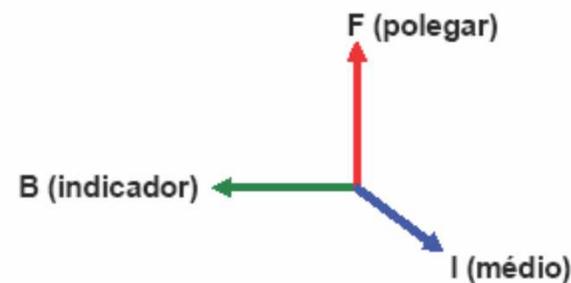


# Força eletromagnética

- **Ação Motriz – Regra da Mão Esquerda: quando resulta uma força:**
  - O dedo polegar indica o sentido da força magnética,  $F$ .
  - O dedo indicador representa o sentido do vetor campo magnético,  $B$ .
  - O dedo médio indica o sentido do corrente,  $I$ .
- **Ação Geradora – Regra da Mão Direita: quando resulta uma corrente gerada:**
  - O dedo polegar indica o sentido da força magnética,  $F$ .
  - O dedo indicador representa o sentido do vetor campo magnético,  $B$ .
  - O dedo médio indica o sentido do corrente,  $I$ .

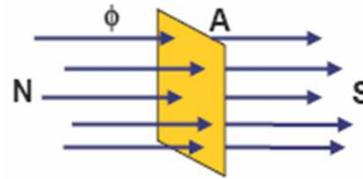


Ação Motriz: mão esquerda



Ação Geradora: mão direita

# Resumo



Fluxo magnético:

$$\phi = BA = [Tm^2] = [Wb]$$

Intensidade de Campo:

$$H = \frac{NI}{l} = \left[ \frac{Ae}{m} \right]$$

$$H = \mu B$$

Relutância:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = [Wb/Ae]$$

Força Magneto Motriz (*fmm*):

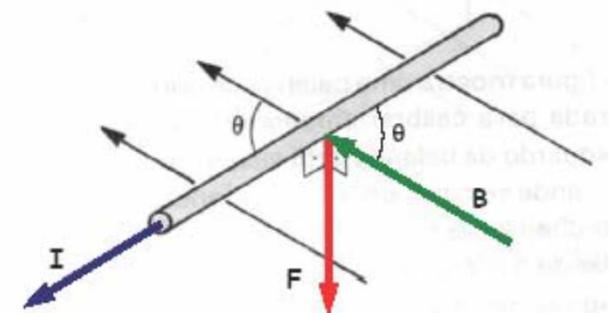
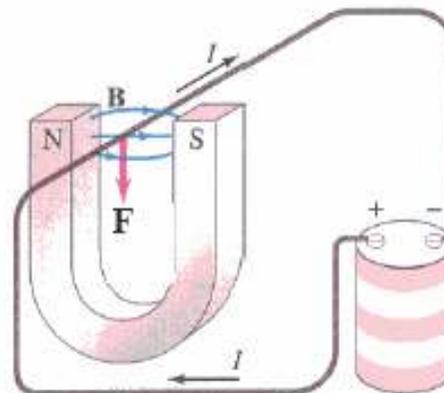
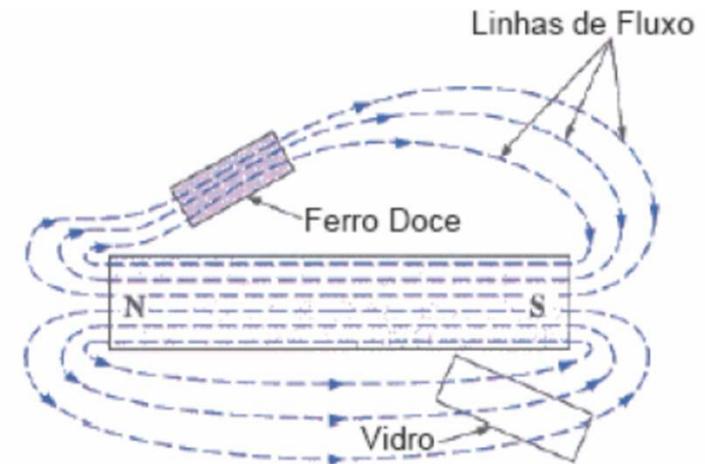
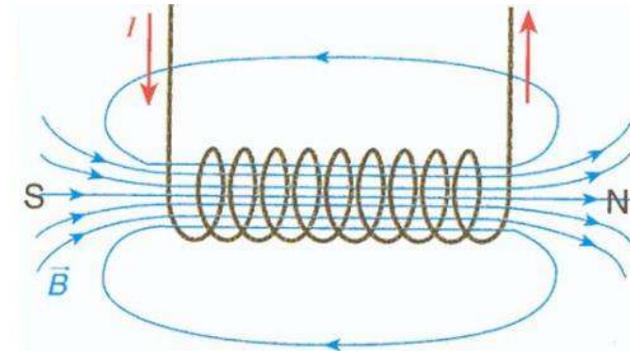
$$fmm = NI = [Ae]$$

$$fmm = Hl$$

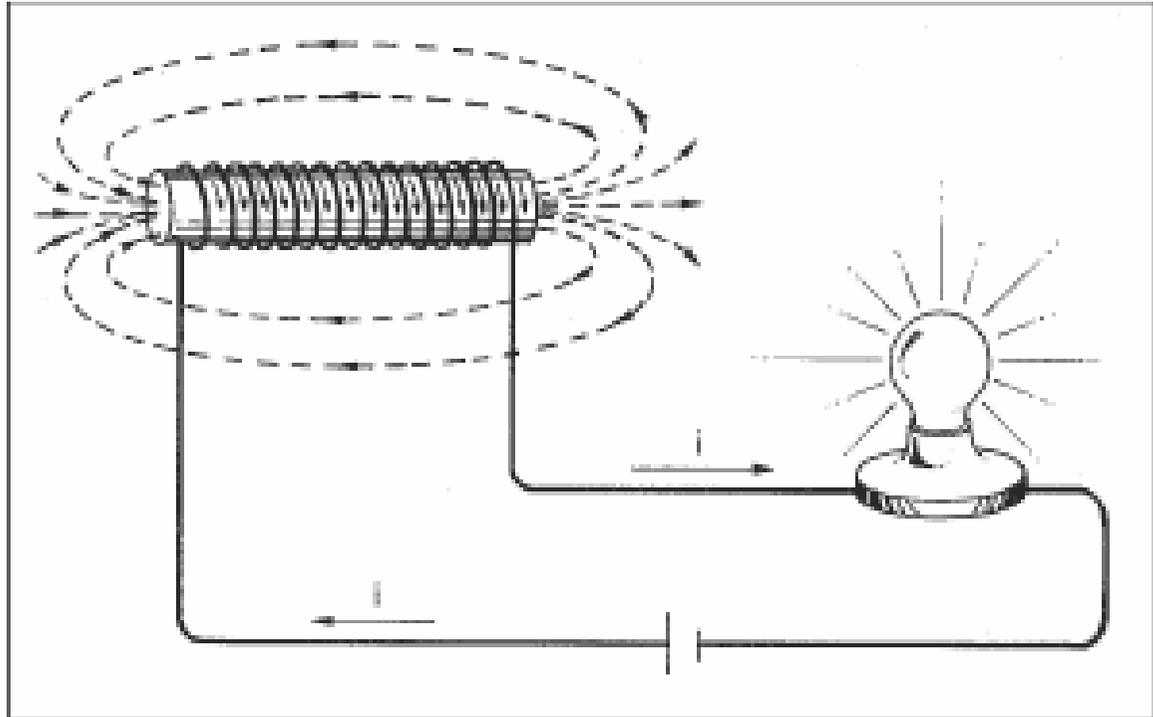
$$fmm = \frac{\phi}{\mathfrak{R}}$$

Força eletromagnética

$$F = I \cdot l \cdot \text{sen}\theta = [Newton]$$



# Exercícios



- O solenoide da figura ( $N = 1000$ ,  $l = 30\text{cm}$ ,  $\mu_r = \frac{5000}{\pi}$ ,  $A = 10\text{mm}^2$ ) é alimentado por uma fonte de  $30\text{V}$ , a lâmpada possui potência de  $300\text{W}$ .

Desprezando a resistência elétrica do fio, calcule:

- $I, \mathcal{R}, \mu, H, B, \phi, fmm,$   $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$

# Resultados

- $l = \frac{30}{100} = 0.3m$
- $A = \frac{10}{10^6} = 10^{-5}m^2$
- $I = \frac{P}{V} = \frac{300}{30} = 10A$
- $\mu = \mu_r \mu_0 = \frac{5000.4.\pi.10^{-7}}{\pi} = 2.10^{-3} \frac{Ae}{m}$
- $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0,3}{2.10^{-3}.10^{-5}} = 15.10^6 \frac{Wb}{Ae}$
- $H = \frac{NI}{l} = \frac{1000.10}{0.3} = 33333,33 \frac{Ae}{m}$
- $B = \frac{H}{\mu} = \frac{33333.33}{2.10^{-3}} = 16,67.10^6 T$
- $\phi = B.A = 16,67.10^6.10^{-5} = 166,7Wb$
- $fmm = NI = 10.1000 = 10000Ae$

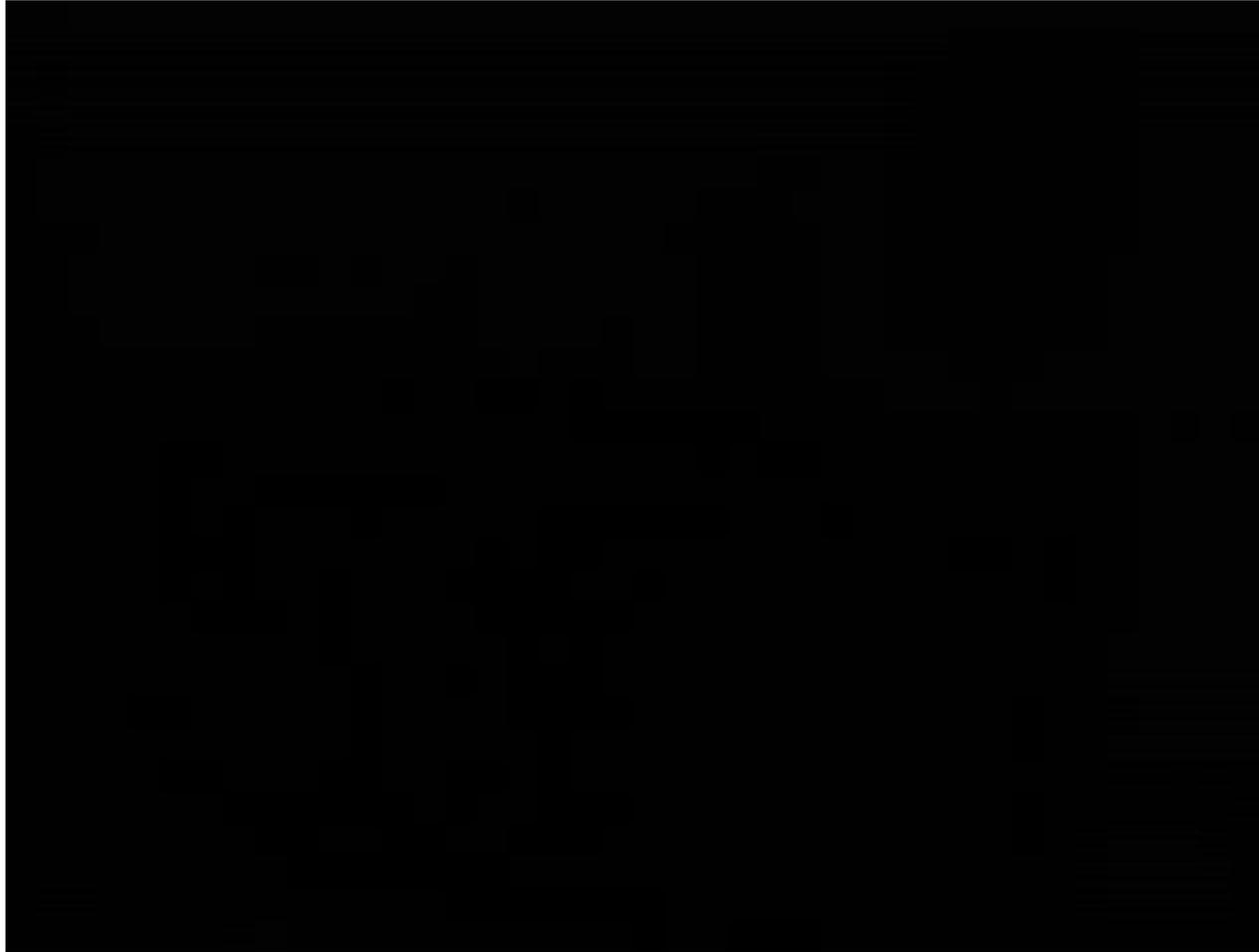
# Indução Eletromagnética

- O inglês Michael Faraday e o americano Joseph Henry se dedicaram a obter corrente elétrica a partir do campo magnético.
- O experimento de Faraday mostra que se numa região próxima a um condutor, bobina ou circuito elétrico houver uma variação de fluxo magnético, aparecerá nos seus terminais uma diferença de potencial (ddp), chamada de **força eletromotriz induzida (fem)** ou **tensão induzida**. Caso o circuito elétrico esteja fechado, esta força eletromotriz induzida fará circular uma **corrente elétrica induzida**.
- [Vídeo indução eletromagnética](#)
- [..\eletricidade instrumental\videos\Lei da indução de Faraday.mp4](#)

# Força Eletromotriz

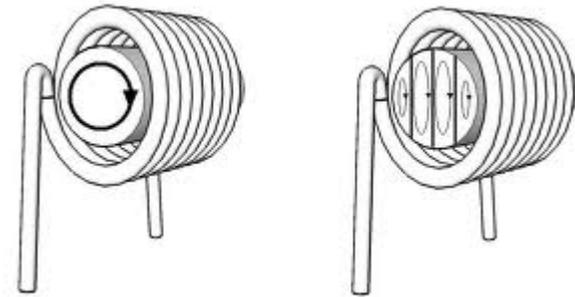
- $\text{fem} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$
- $\varepsilon$ : força eletromotriz induzida (tensão induzida), [V];
- $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ : taxa de variação do fluxo magnético no tempo, [Wb/s]
- $N$ : número de espiras na bobina.
- Lei de Lenz: O sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.
- Vídeo [Gerador Elétrico](#)

# Aquecedor por Indução Magnética

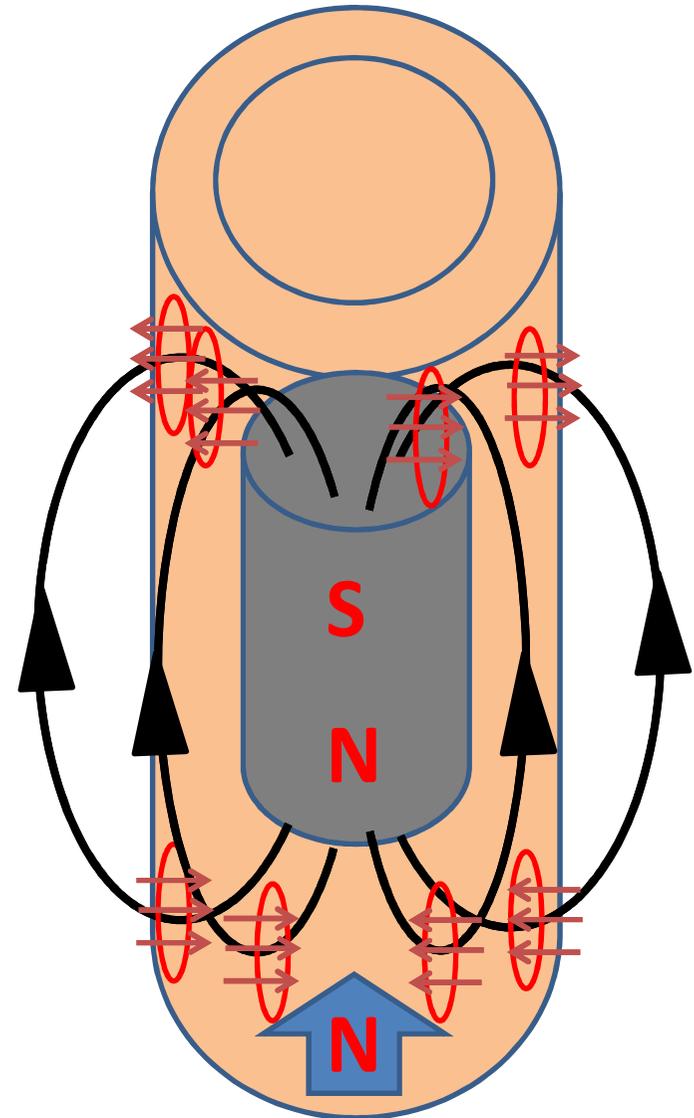


# Correntes parasitas ou de Foucault

- Quando uma corrente de alta intensidade percorre as espiras elas induzem correntes no interior do condutor maciço, chamadas de correntes parasitas ou de Foucault.
- Para reduzir essas correntes em situações em que elas são indesejáveis, o núcleo metálico é composto por laminas compactadas.



# Freio de Foucault



# Freio de Foucault

