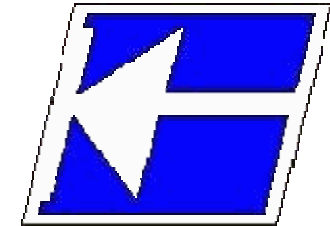


Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Departamento de Eletrônica
Retificadores



**Campos Magnéticos,
Densidade de Fluxo,
Permeabilidade e Relutância**

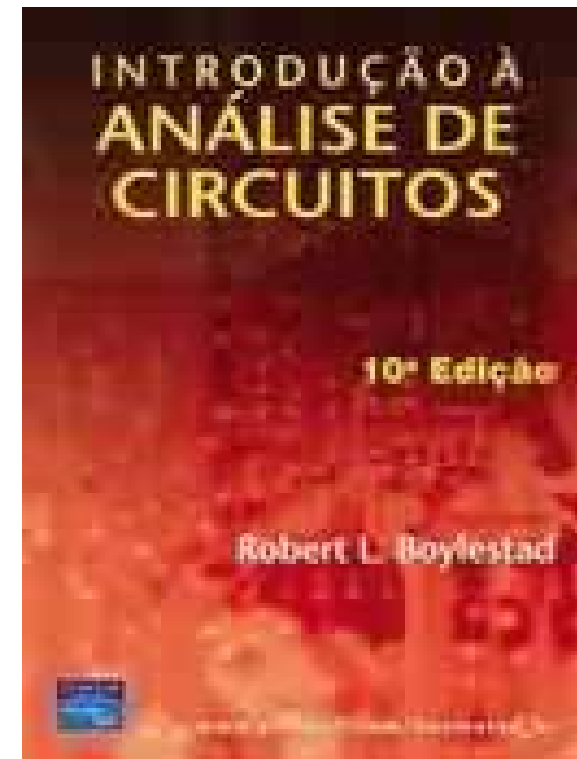
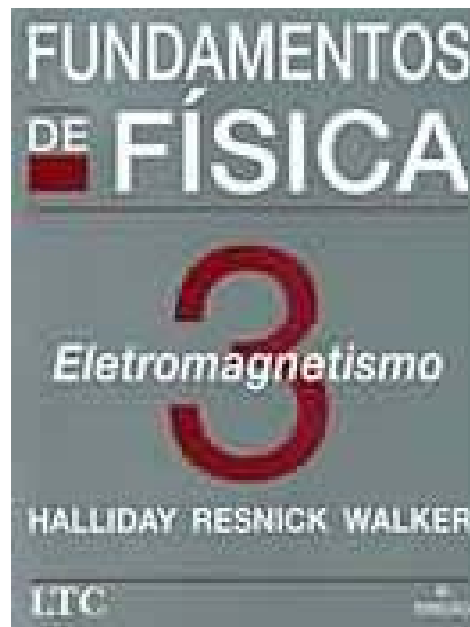
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2007.

Nesta aula

Capítulo 11: Circuitos Magnéticos

1. Conceitos iniciais;
2. Campos magnéticos;
3. Densidade de Fluxo magnético;
4. Permeabilidade magnética;
5. Relutância.

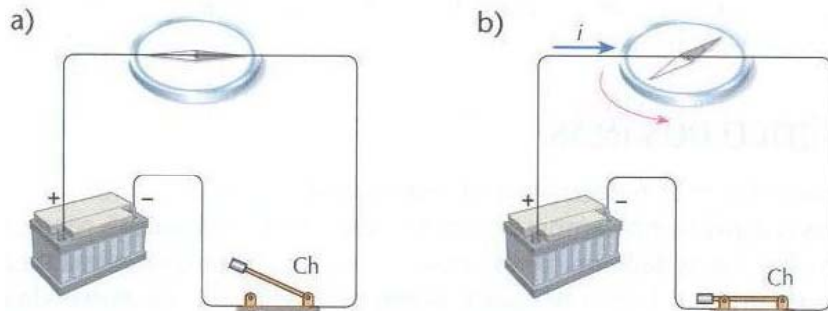


Conceitos iniciais

Divisão histórica:

- Magnetismo;
- Eletromagnetismo.

Breve história do eletromagnetismo




Experiência de Oersted em 1820

HISTÓRIA DA FÍSICA


DO MAGNETISMO AO ELETROMAGNETISMO

Pouco se sabe a respeito da origem do magnetismo. Uma lenda estabelece que um anônimo pastor de ovelhas da Grécia antiga fez a primeira observação de um fenômeno magnético, ao perceber que a extremidade metálica de seu cajado ficava presa ao se aproximar de determinada pedra. Presume-se que aquela pedra fosse um pedaço de magnetita, um ímã natural. Entretanto, outras referências históricas fornecem versões diferentes para o advento do magnetismo. Parece que os chineses, considerados os inventores da bússola, e outros povos antigos havia muito tempo lidavam com fenômenos magnéticos. O estudo sistemático desses fenômenos, na Europa, teve início com o cientista inglês William Gilbert (1544-1603), contemporâneo de Galileu, que o apontou como o criador do método experimental. Em 1600, publicou sua principal obra *De magnete*, na qual descreveu várias experiências magnéticas, chegando à conclusão, entre outras, de que a Terra era uma grande esfera imantada.

O nascimento do Eletromagnetismo se deu com a clássica experiência do físico dinamarquês HANS CHRISTIAN OERSTED (1771-1851). Em 1820, ele verificou que, ao colocar uma bússola sob um fio elétrico, a agulha se desviava quando se fazia passar uma corrente pelo fio. A partir desse fato, foi possível estabelecer a conexão entre a corrente elétrica e os fenômenos magnéticos, permitindo um extraordinário desenvolvimento científico nessa área.



Oersted e seu auxiliar realizando experiências.




Ampère e seu colega Arago fazendo experimentos de Eletromagnetismo.

Vários cientistas se destacaram nesse processo. O físico e matemático francês ANDRÉ-MARIE AMPÈRE (1775-1836) construiu o primeiro eletroímã. Esse dispositivo foi fundamental para a posterior invenção e aperfeiçoamento de vários aparelhos, como o telefone, o microfone, o telégrafo etc. MICHAEL FARADAY (1791-1867), notável cientista autodidata inglês, dedicou-se a diversos ramos da Física. No Eletromagnetismo, sua grande contribuição foi a descoberta do fenômeno da **indução eletromagnética**, que serviu de base para que pudessem surgir os geradores mecânicos de eletricidade e os transformadores.

Merecem ainda ser lembrados, por sua contribuição à evolução do Eletromagnetismo: o físico norte-americano JOSEPH HENRY (1797-1878), que continuou os trabalhos de Faraday sobre a indução eletromagnética; HEINRICH LENZ (1804-1865), físico russo, que também se dedicou a estudar esse fenômeno; WILHELM WEBER (1804-1891), físico alemão; NICOLAS TESLA (1856-1943), físico croata, entre outros.

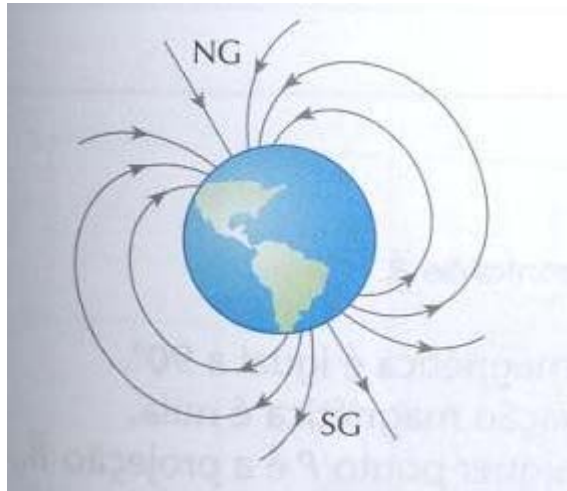
Por fim, uma menção especial a JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879), notável físico escocês, cuja participação, se não foi exatamente prática, teve importância teórica fundamental. Maxwell conseguiu estabelecer uma teoria matemática consistente, em sua célebre obra *Tratado sobre eletricidade e magnetismo* (publicada em 1873), na qual generalizou os princípios da Eletricidade descobertos antes por Coulomb, Ampère, Faraday e outros. A descoberta posterior das ondas eletromagnéticas constituiu a verificação experimental do acerto da teoria de Maxwell.



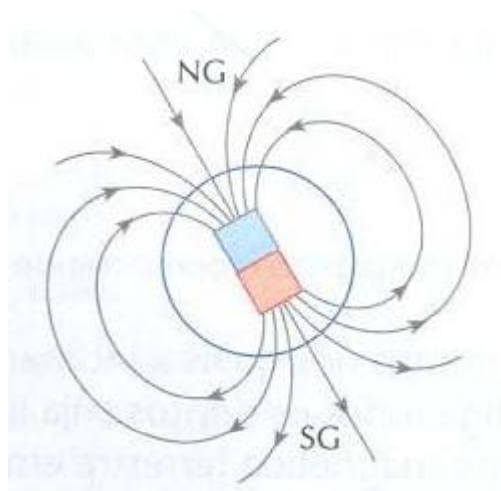
Michael Faraday. Joseph Henry. Nicolas Tesla. James Clerk Maxwell.

Conceitos iniciais

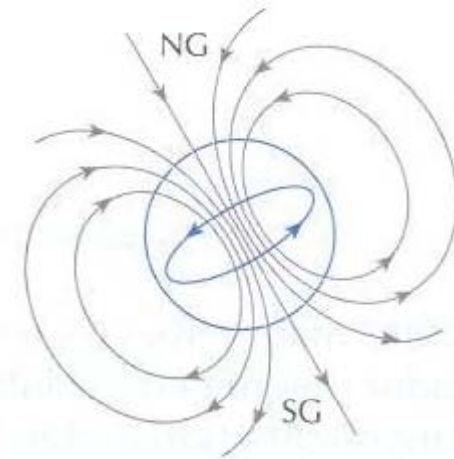
Magnetismo terrestre



Magnetismo terrestre



A terra como um ímã

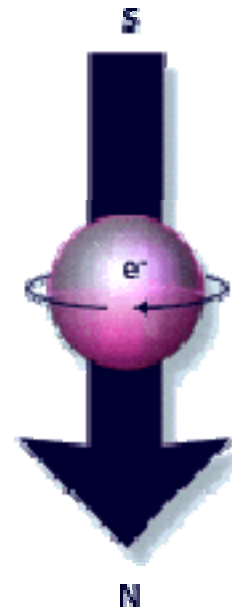
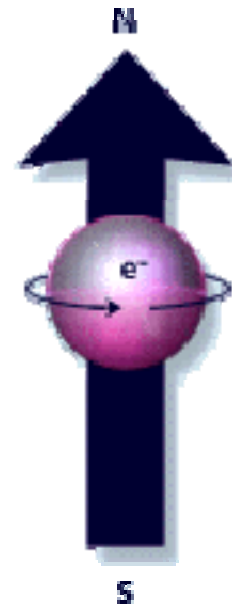
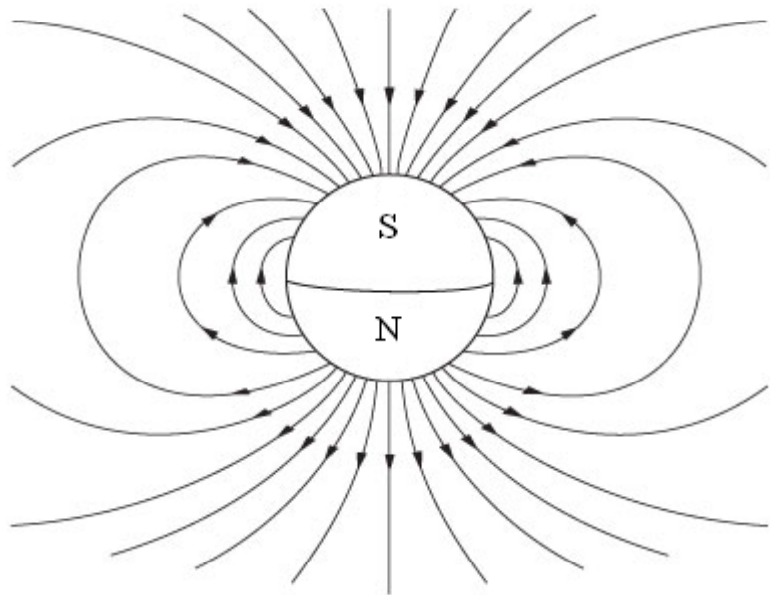


Explicação moderna

Conceitos iniciais

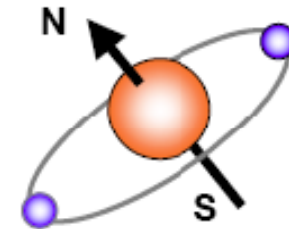
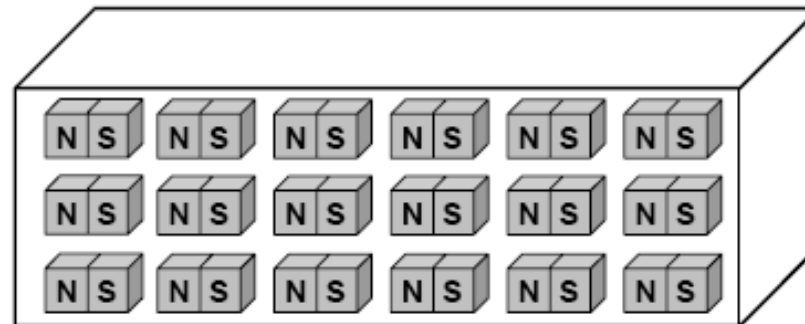
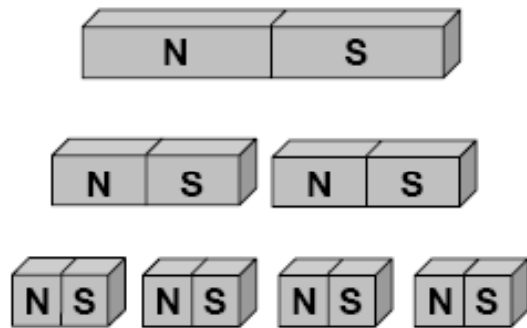
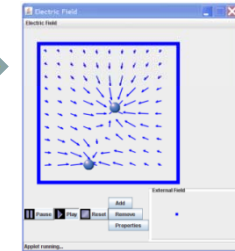
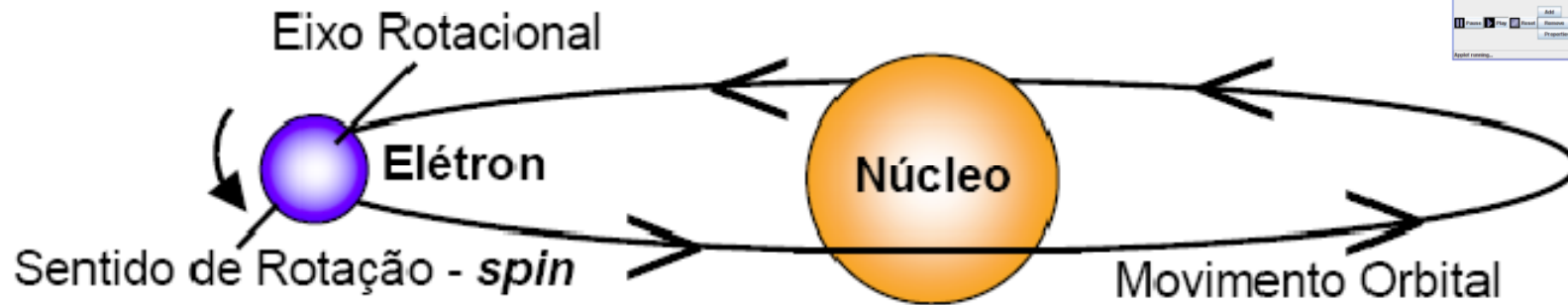
Dipolos magnéticos:

- Determinam o comportamento dos materiais num campo magnético;
- Tem origem no momentum angular dos elétrons nos íons ou átomos que formam a matéria.



Conceitos iniciais

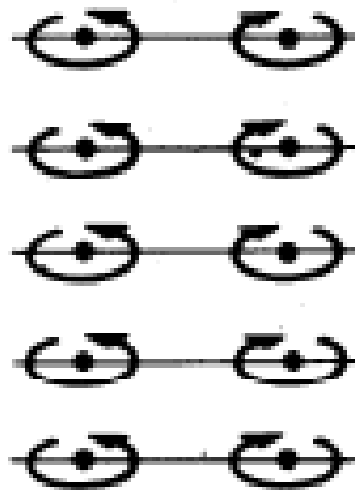
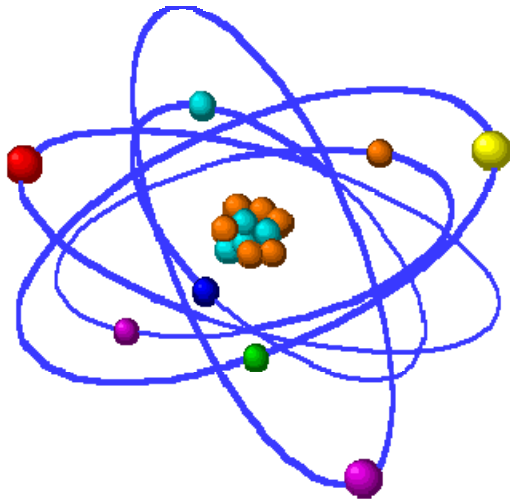
Dipolos magnéticos



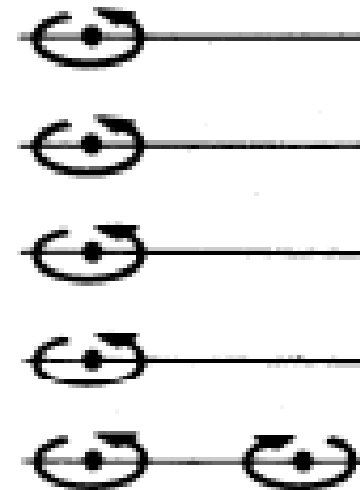
Conceitos iniciais

Magnetismo atômico:

- 2 elétrons ocupam o mesmo nível energético;
- Estes elétrons tem spins opostos;
- Subníveis internos não completos dão origem a um momento magnético não nulo.



Momento - 0

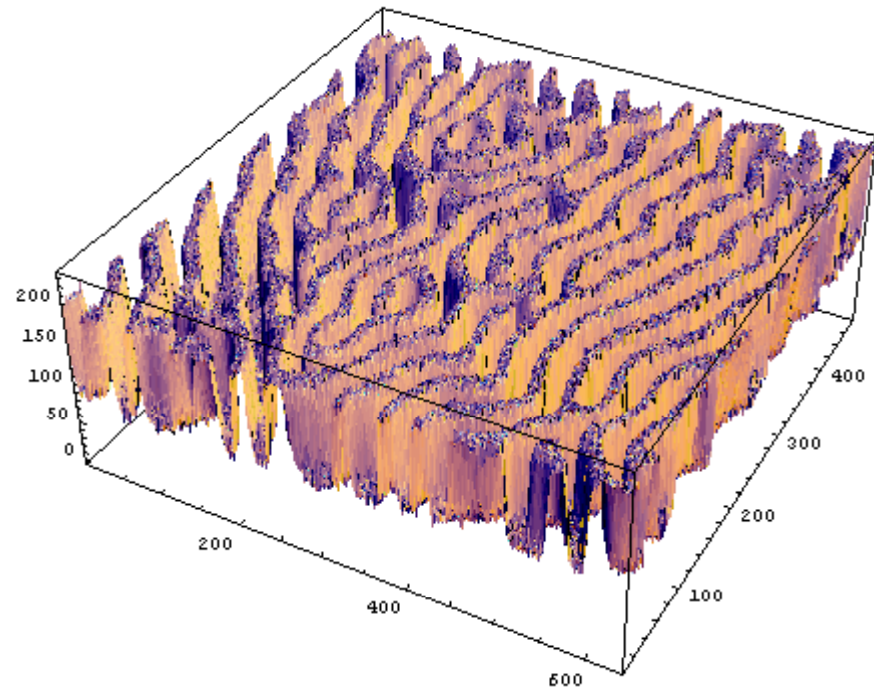
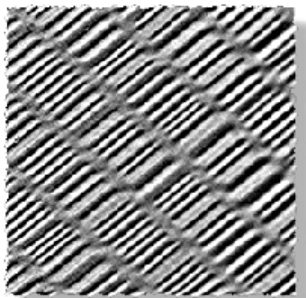
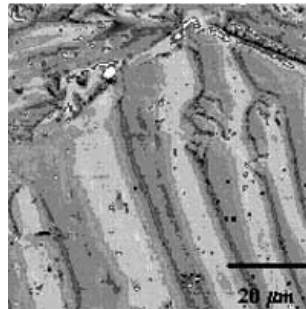
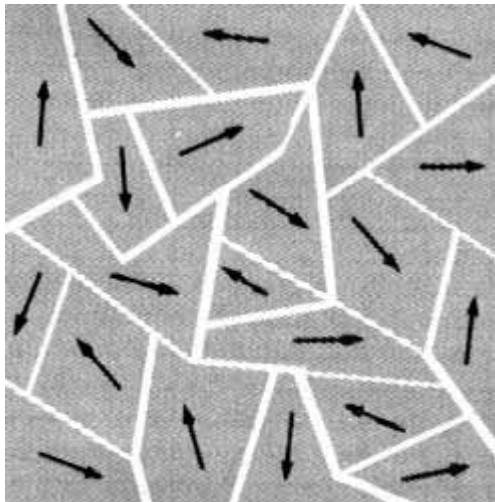


Momento $\neq 0$

Conceitos iniciais

Domínios magnéticos:

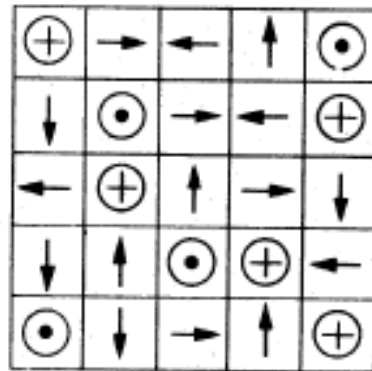
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



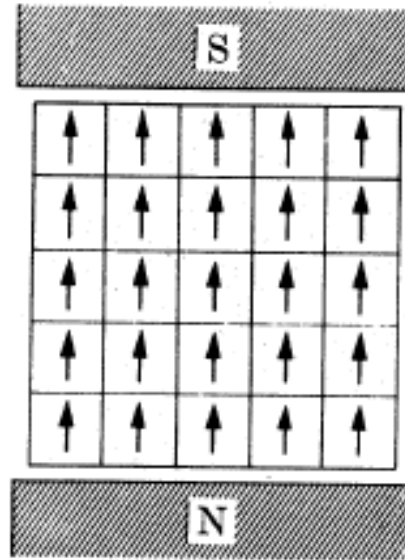
Conceitos iniciais

Alinhamento dos domínios:

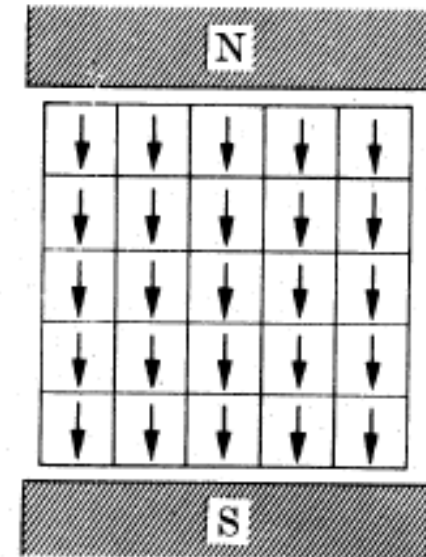
- Aplicando um campo magnético externo.



Desmagnetizado



Magnetizado

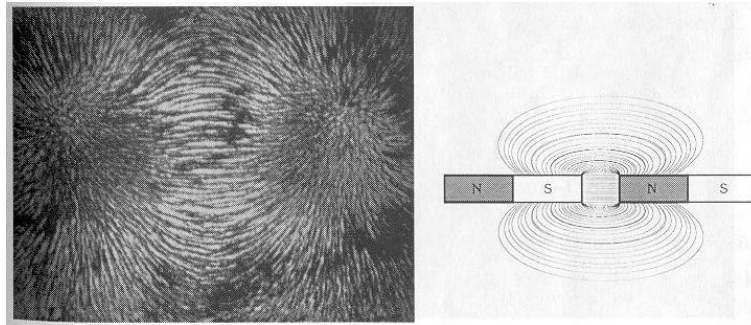


Magnetizado ao contrário

Conceitos iniciais

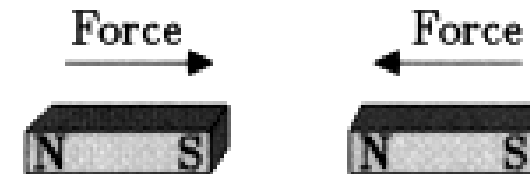
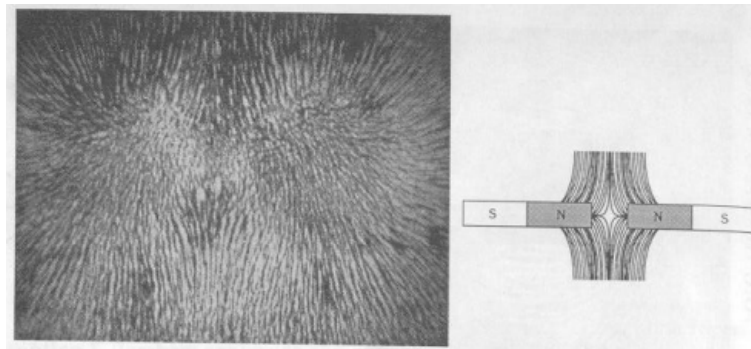
Forças de atração e repulsão magnéticas

Atração



Repulsion

Repulsão



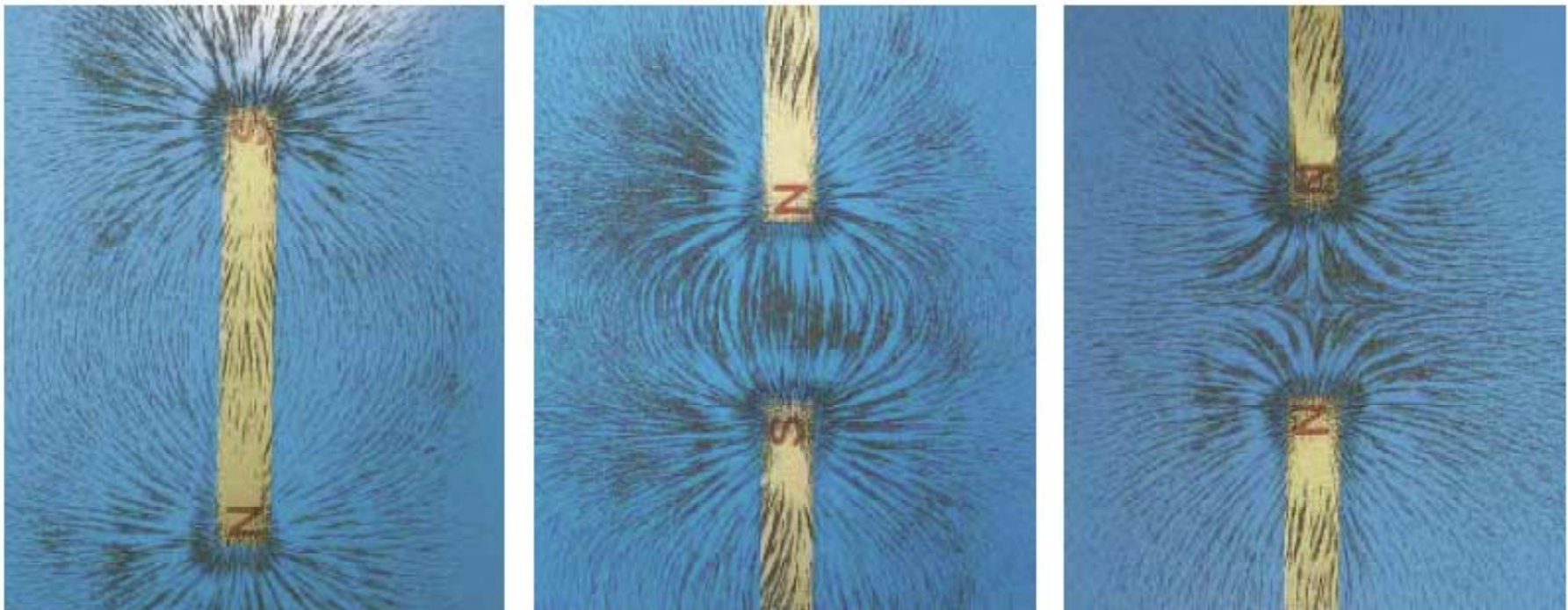
Attraction

Pólos de mesmo nome se repelem e de nomes diferentes se atraem.

Campo magnético

Definição:

Define-se como campo magnético como toda região do espaço em torno de um condutor percorrido por corrente ou de um ímã.

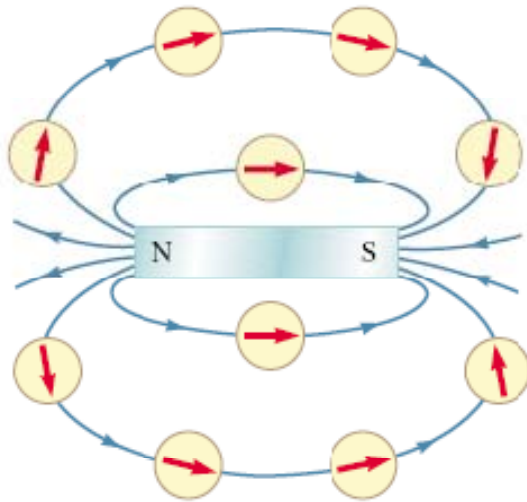


Um ímã produz um campo magnético vetorial, B , em todos os pontos ao seu redor.

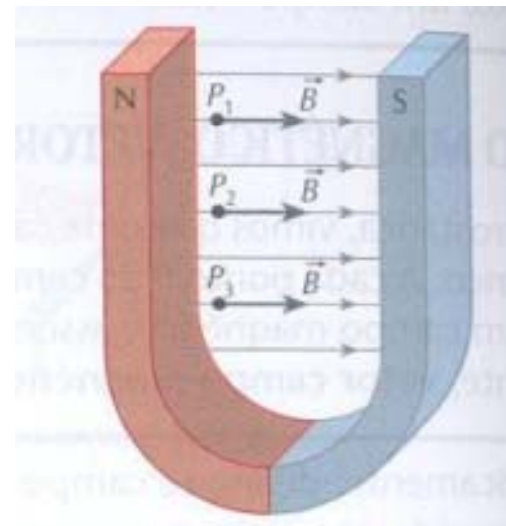
Campo magnético

Linhas de campo magnético:

- São sempre linhas fechadas;
- Nunca se cruzam;
- Fora do imã, saem do norte e são orientadas para o sul;
- Dentro do imã tem orientação contrária;
- Saem e entram perpendicularmente à superfície do imã;
- Quanto maior a concentração das linhas, mais intenso é o campo.

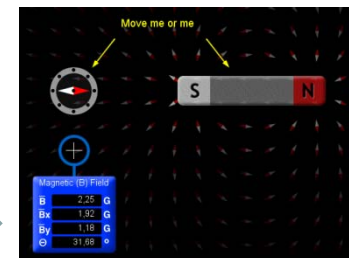
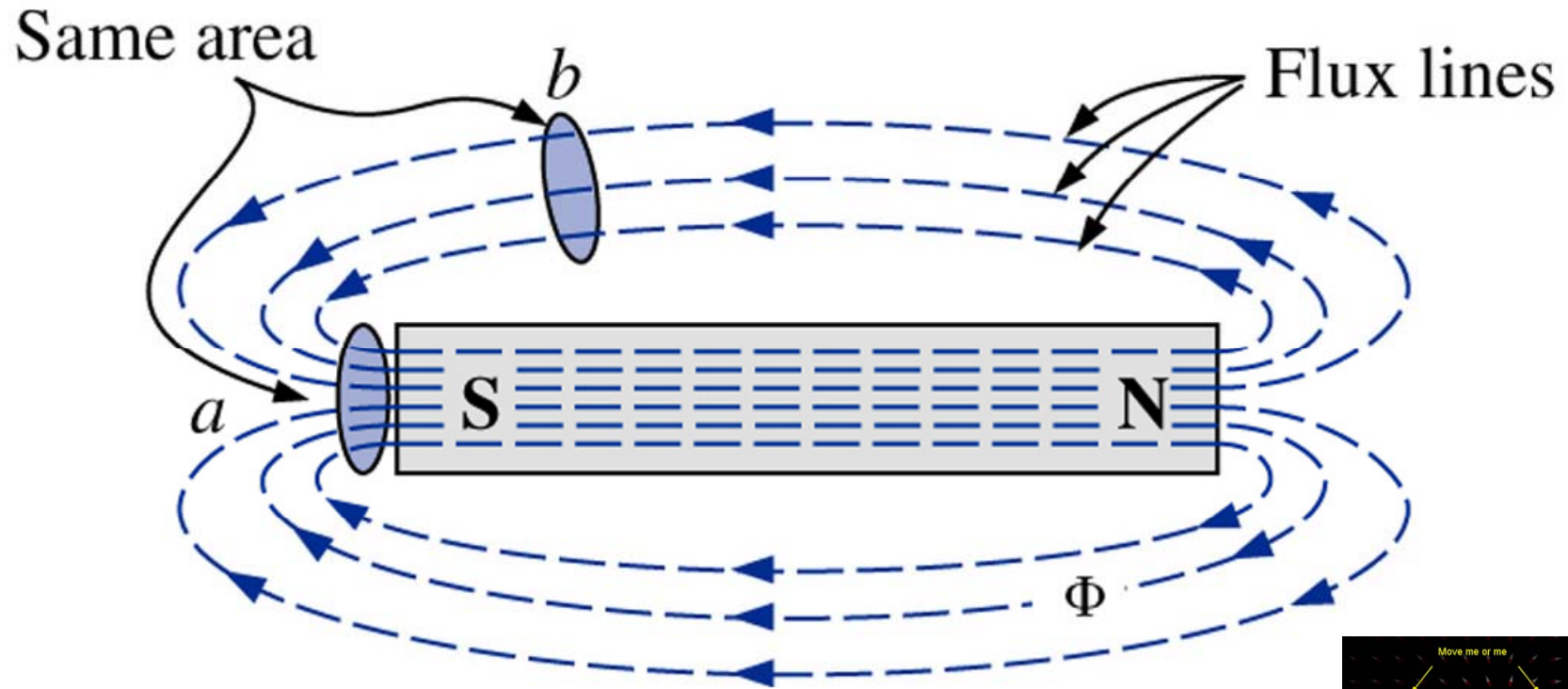


Campo não-uniforme



Campo uniforme

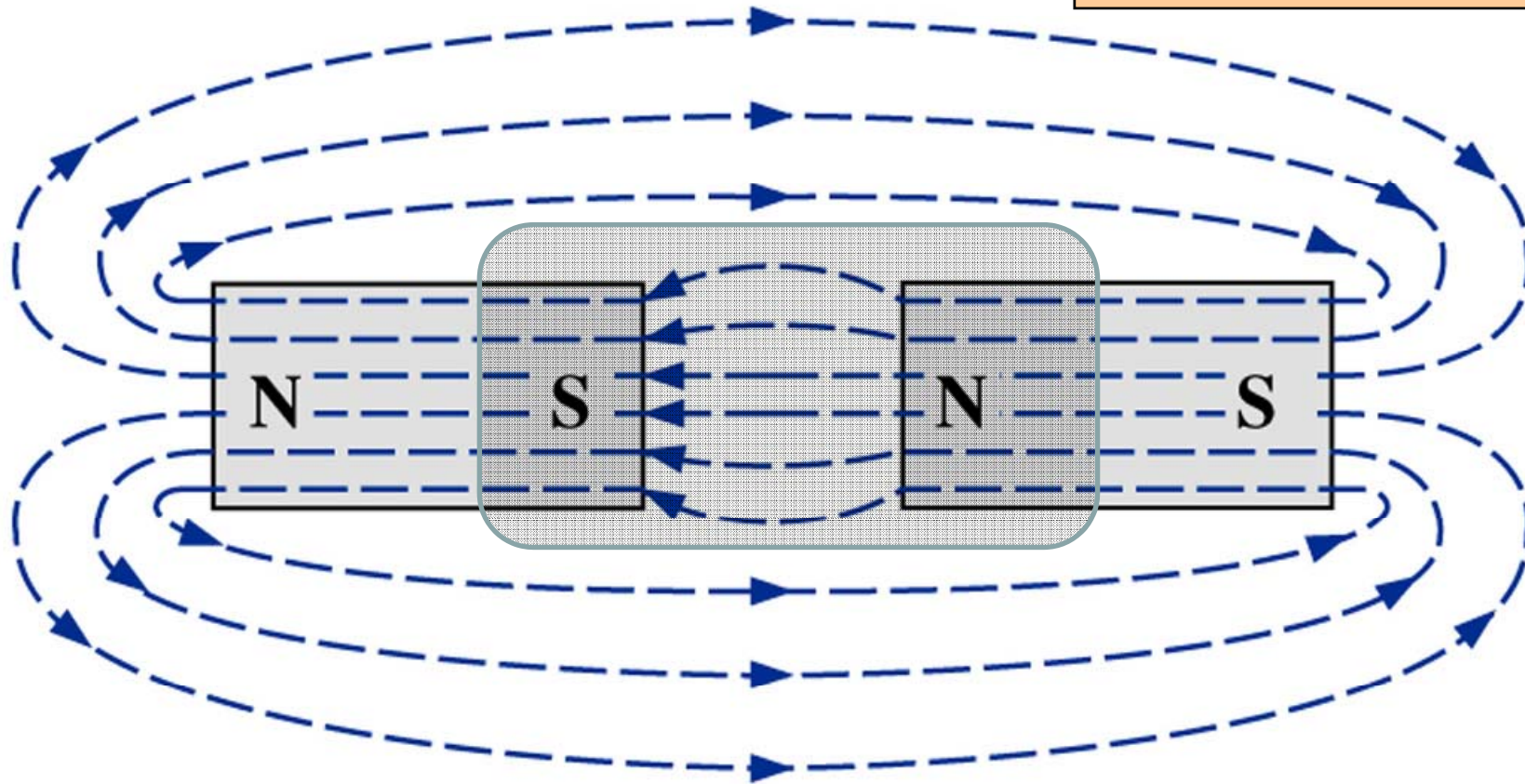
Campo magnético



Linhas de campo magnético para um imã permanente.

Campo magnético

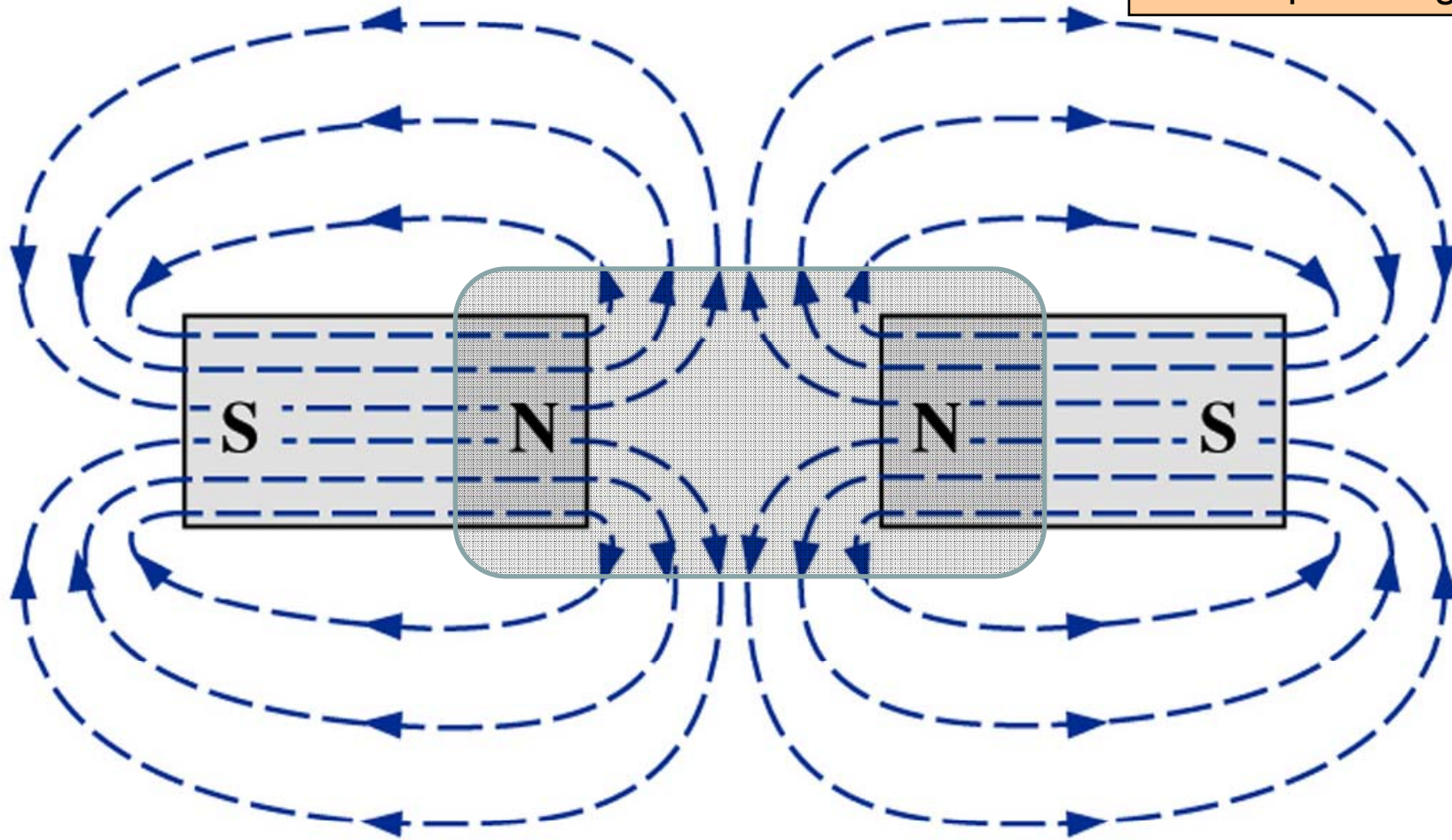
Pólos opostos adjacentes



Distribuição das linhas de campo para um sistema de dois ímãs.

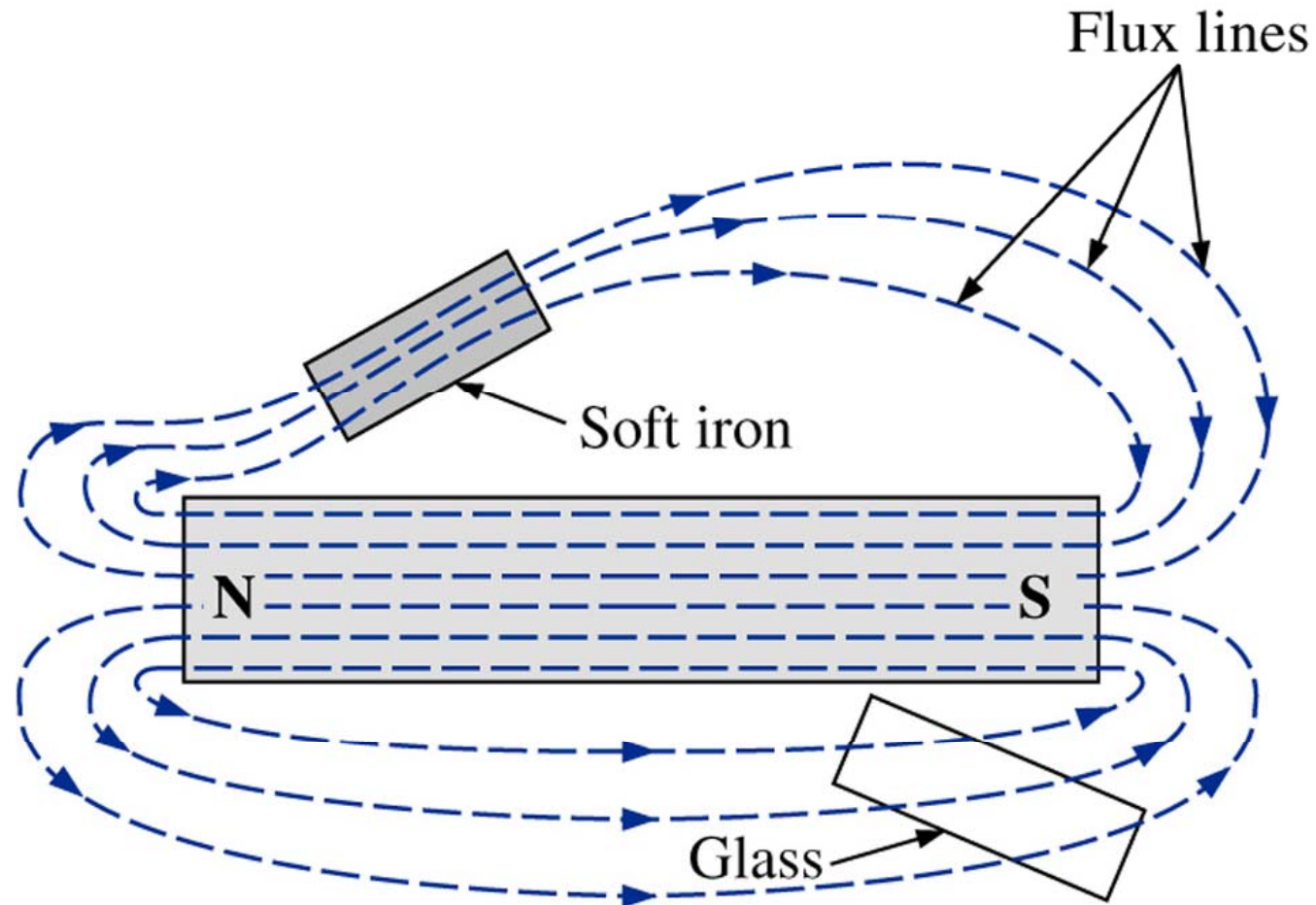
Campo magnético

Pólos opostos iguais



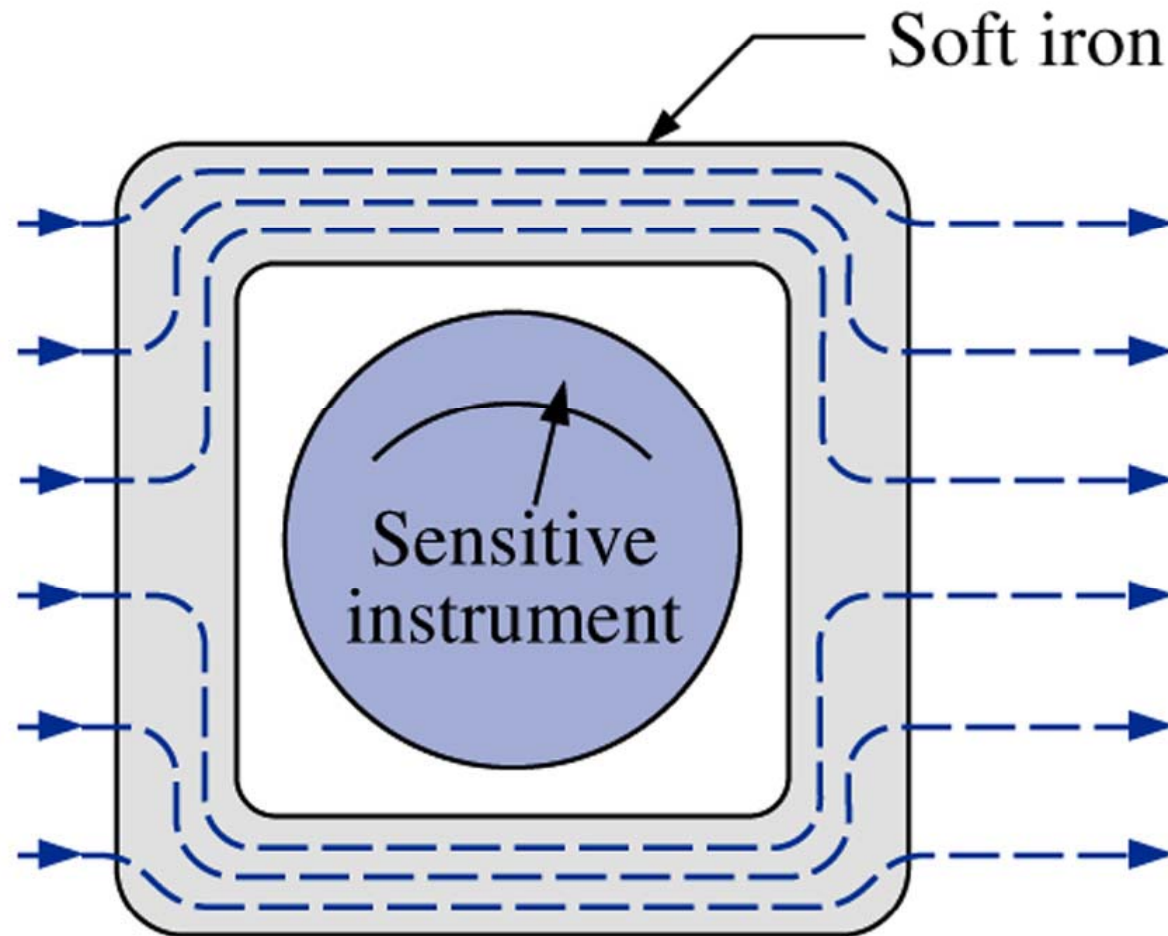
Distribuição das linhas de campo para um sistema de dois ímãs.

Campo magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

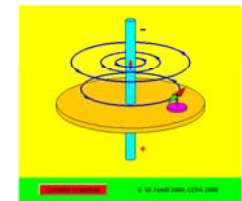
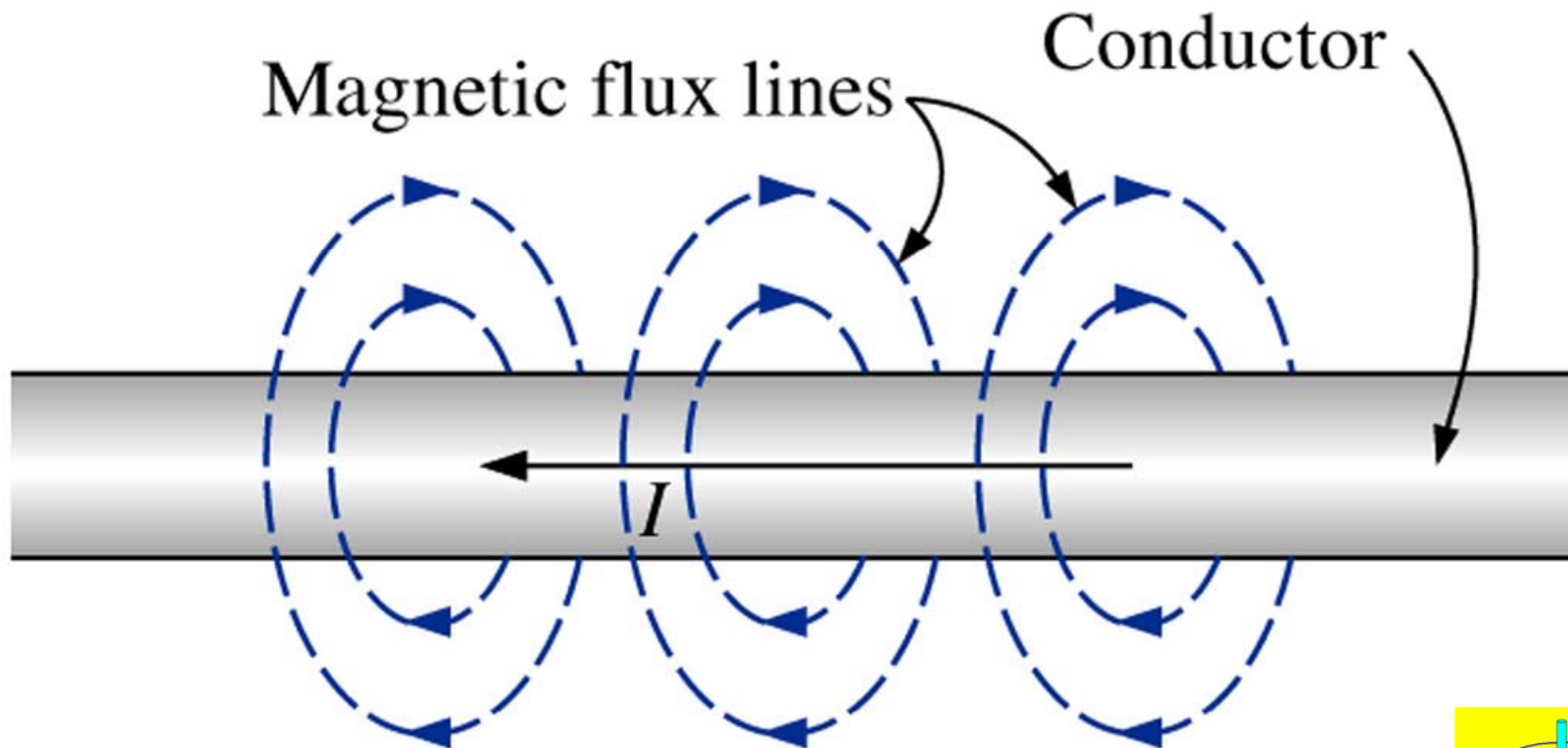
Campo magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

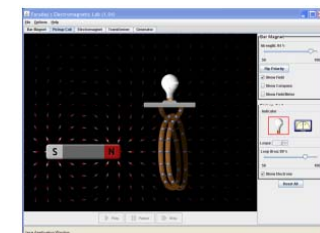
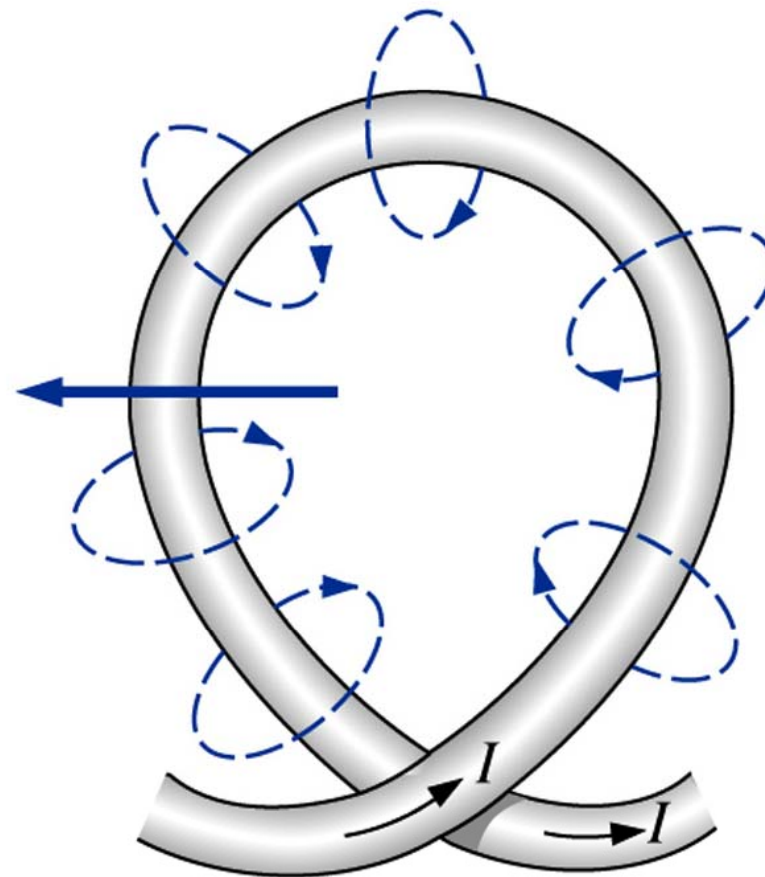
Campo magnético

Linhas de campo em um condutor retilíneo percorrido por corrente:



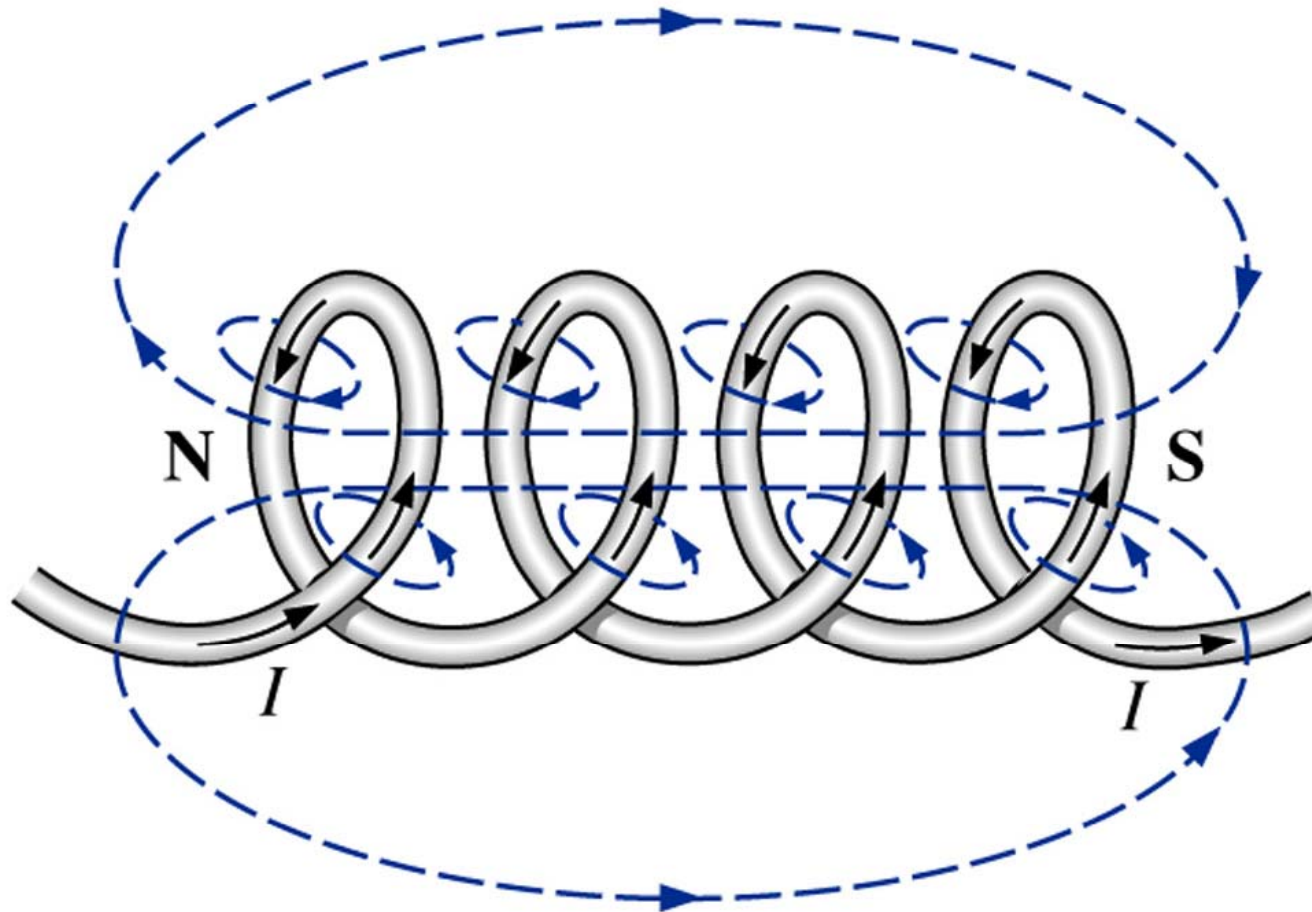
Campo magnético

Linhas de campo em uma espira circular percorrida por corrente:



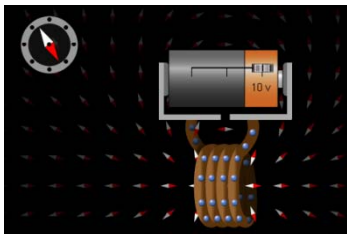
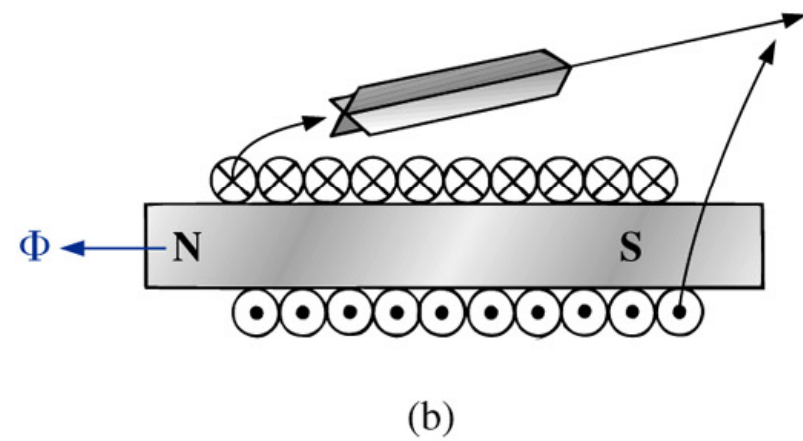
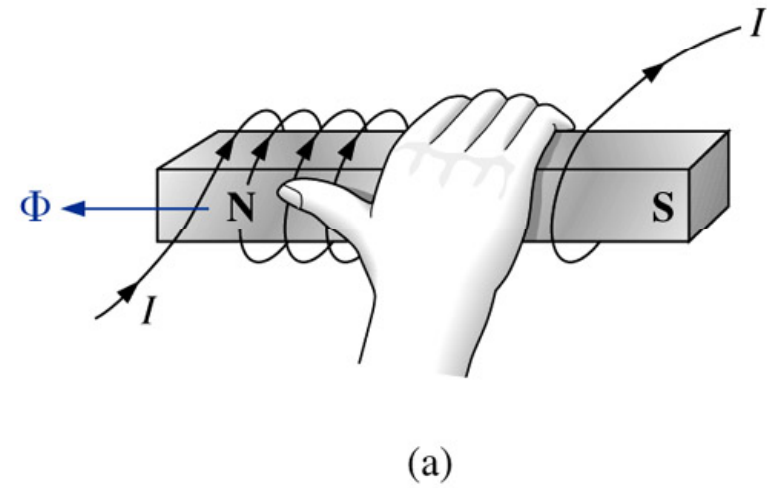
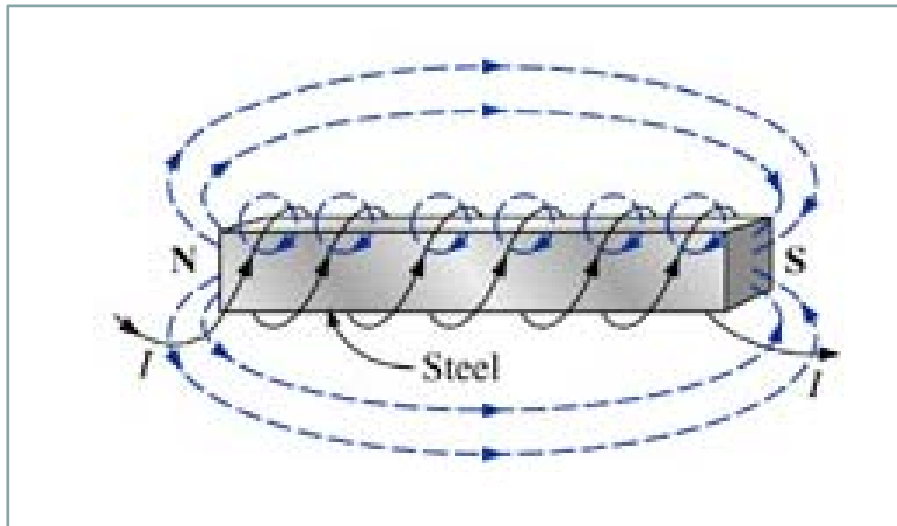
Campo magnético

Linhas de campo em uma bobina percorrida por corrente:



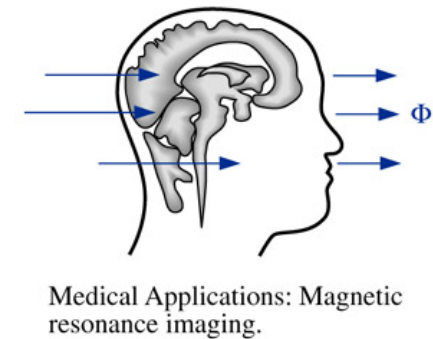
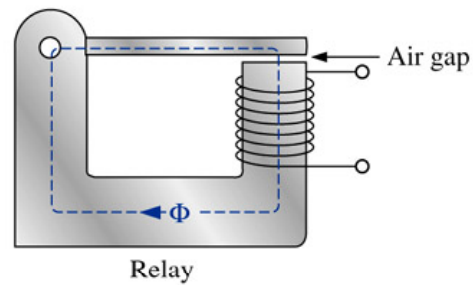
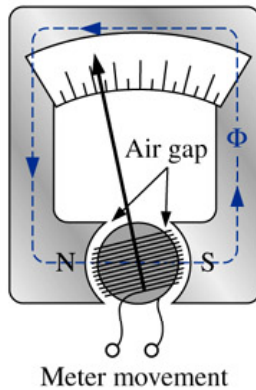
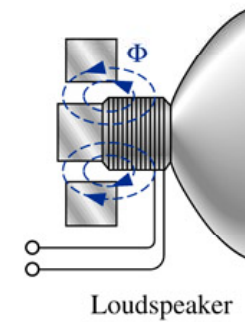
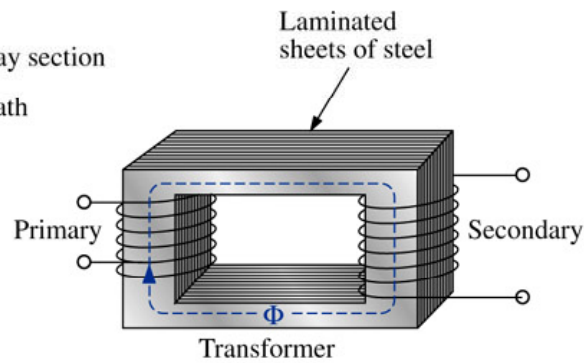
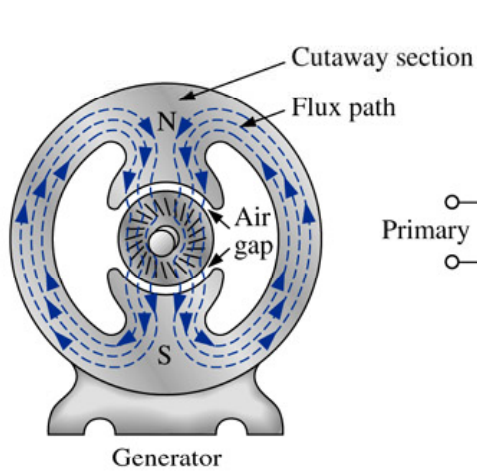
Campo magnético

Eletroímã:



Campo magnético

Algumas aplicações de efeitos magnéticos:



Densidade de fluxo magnético

Densidade de fluxo magnético:

- Densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área.
- Unidade é Tesla [T];
- Um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.

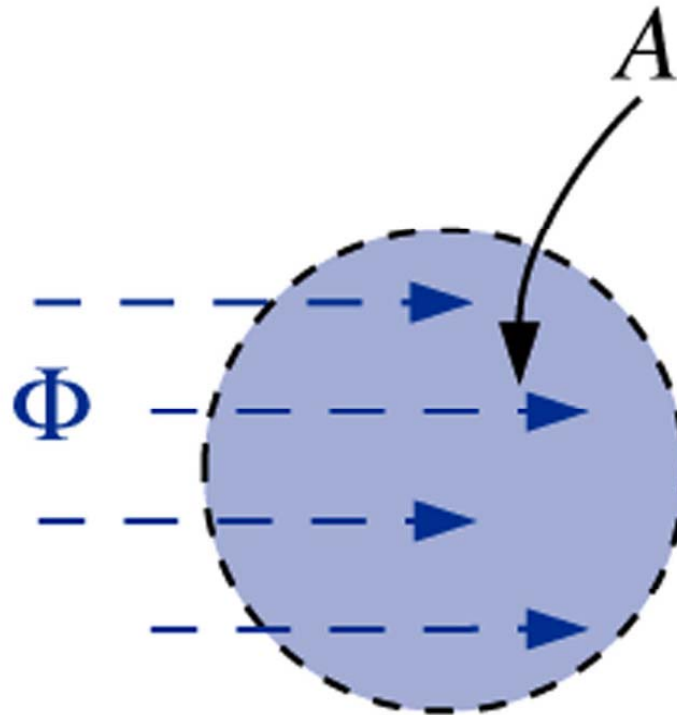
Fluxo magnético:

- Fluxo (ϕ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área.
- Unidade é weber [Wb];
- Um Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo.

Densidade de fluxo magnético

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

- B = teslas (T)
- Φ = webers (Wb)
- A = metros quadrados (m^2)



Densidade de fluxo magnético

Exemplo 11.1: Determine, para a peça da figura abaixo, a densidade de fluxo em teslas:



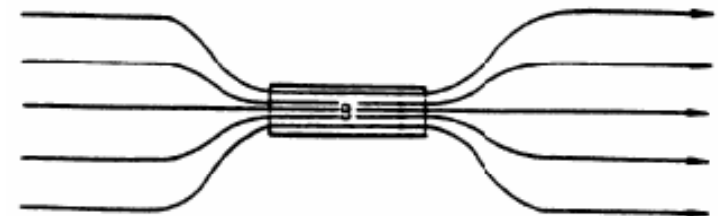
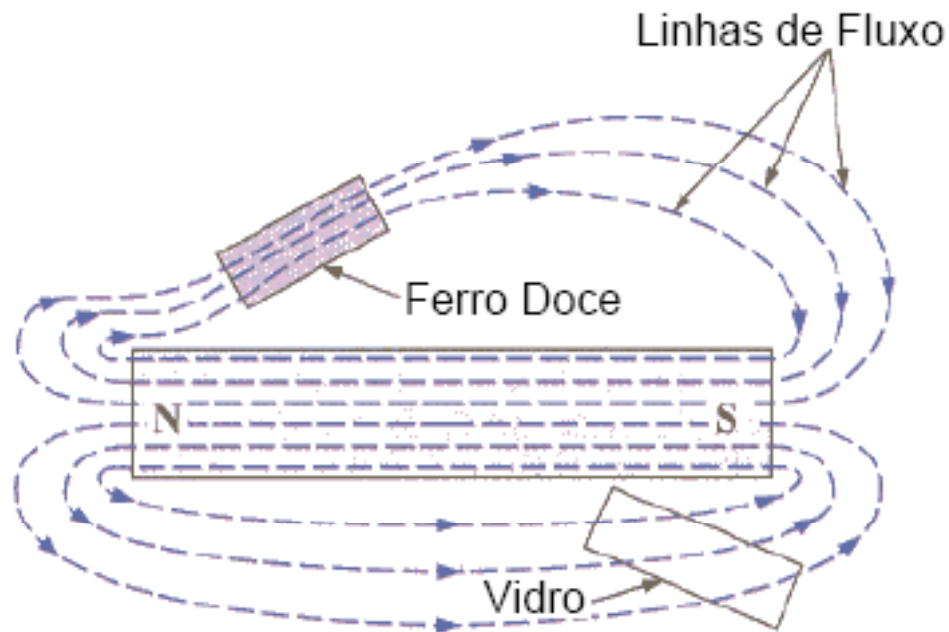
$$\begin{aligned}\Phi &= 6 \times 10^{-5} \text{ Wb} \\ A &= 1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{6 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 5 \cdot 10^{-2} T$$

Permeabilidade magnética

Permeabilidade magnética:

- Grau de magnetização de um material em resposta ao campo magnético;
- Facilidade de “conduzir” o fluxo magnético;
- Simbolizado pela letra μ .



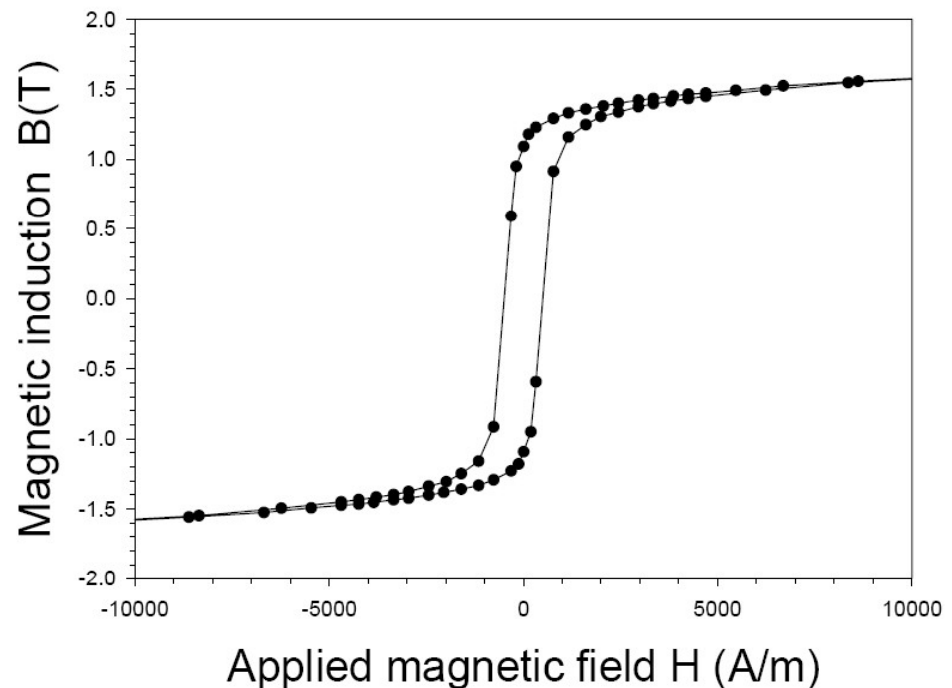
Permeabilidade magnética

$$\mu = \frac{B}{H} \longrightarrow \text{Permeabilidade absoluta}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \longrightarrow \text{Permeabilidade relativa}$$

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

Permeabilidade do vácuo



Permeabilidade magnética

Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
$\cong 1$	Paramagnéticos
< 1	Diamagnéticos

Tipo de Material	Permeabilidade Relativa, μ_R
Ferro Comercial	9.000
Ferro Purificado	200.000
Ferro Silício	55.000
Permalloy	1×10^6
Supermalloy	1×10^7
Permendur	5.000
Ferrite	2.000

Susceptibilidade magnética

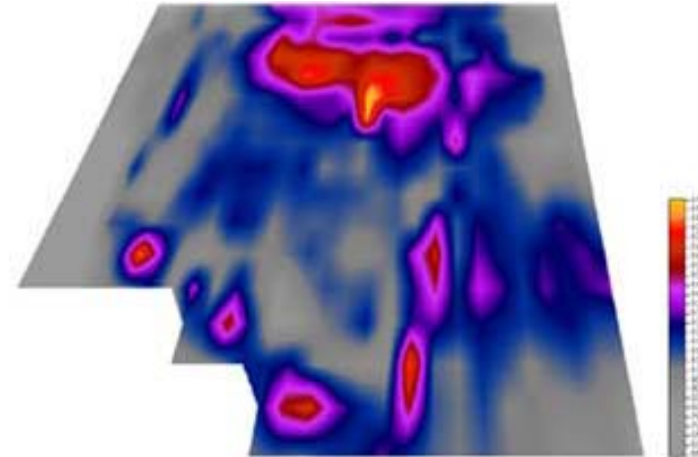
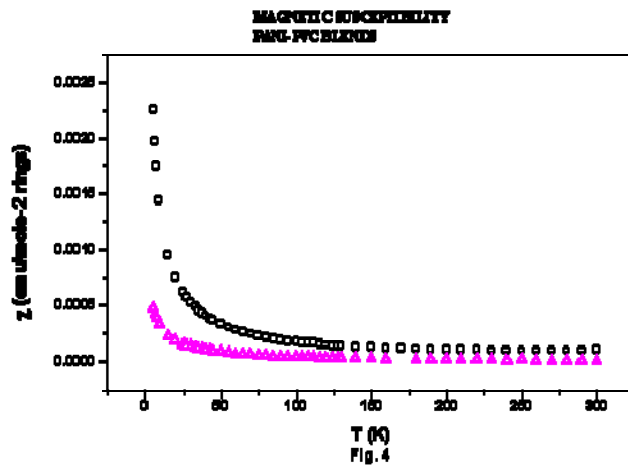
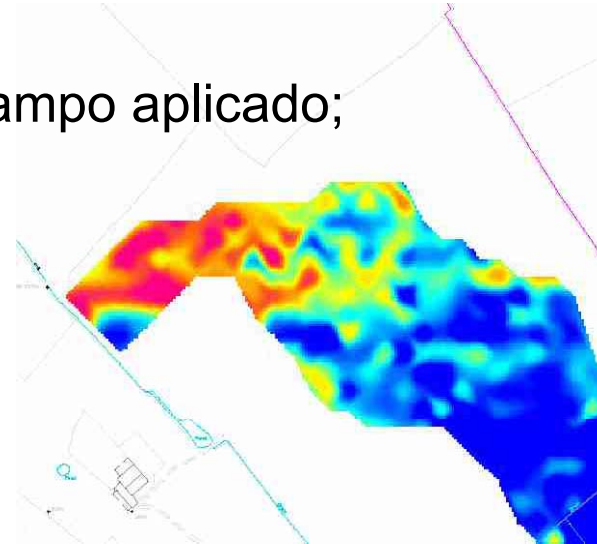
Susceptibilidade magnética:

- É a resposta do material a um campo aplicado;
- Simbolizado pela letra χ .

$$B = \mu_o \cdot (H + M)$$

SI $\mu = \mu_o \cdot (1 + \chi)$

CGS $\mu = 1 + 4\pi \cdot \chi$



Relutância magnética

Relutância magnética:

- É uma medida da oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético.

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

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

- \mathfrak{R} = relutância (A/Wb)
- μ = permeabilidade (Wb/A/m)
- l = comprimento (m)

Relutância magnética

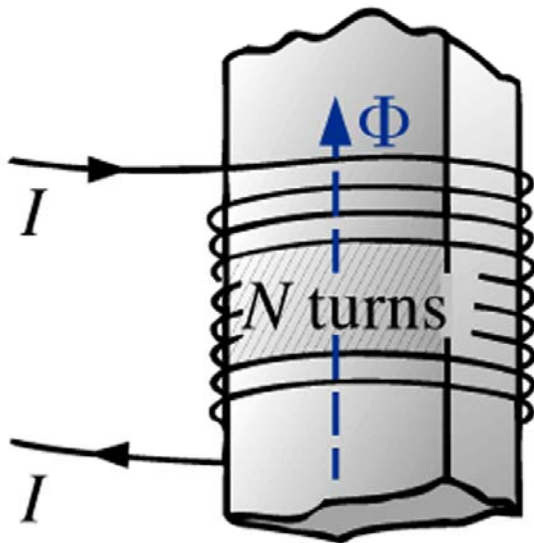
Lei de ohm para circuitos magnéticos:

$$\text{Efeito} = \frac{\text{causa}}{\text{oposição}}$$

$$\Phi = \frac{\mathcal{I}}{\mathcal{R}}$$

$$\mathcal{I} = NI$$

- \mathcal{R} = relutância (A/Wb)
- \mathcal{I} = força magnetomotriz (A)
- Φ = fluxo magnético (Wb)



Na próxima aula

Capítulo 11: Circuitos magnéticos

1. Força magnetizante;
2. Histerese;
3. Perdas magnéticas.

