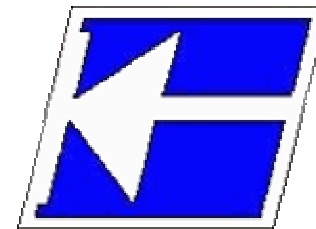


Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Gerência Educacional de Eletrônica
Fundamentos de Eletricidade

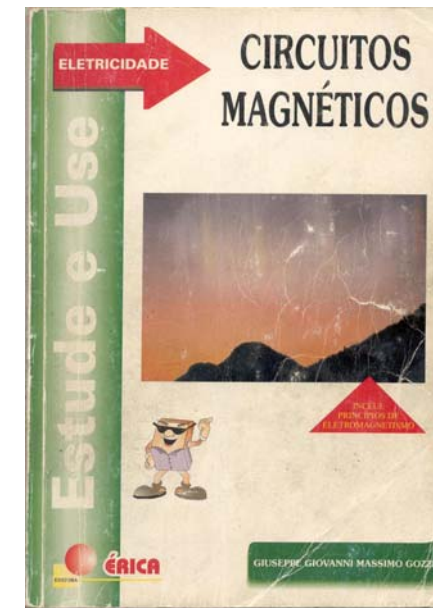


Aulas de Eletromagnetismo

Clóvis Antônio Petry, professor.

Florianópolis, novembro de 2006.

Bibliografia



Nesta aula

Seqüência de conteúdos:

1. Conceitos iniciais;
2. Campo magnético;
3. Força magnética;
4. Indução eletromagnética;
5. Materiais magnéticos.

Parte 1

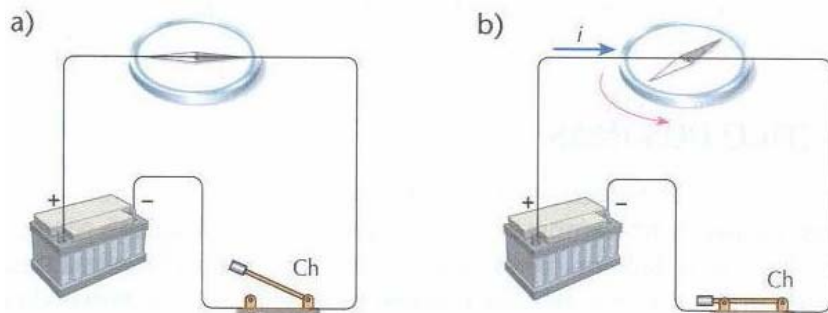
Conceitos Iniciais

Conceitos iniciais

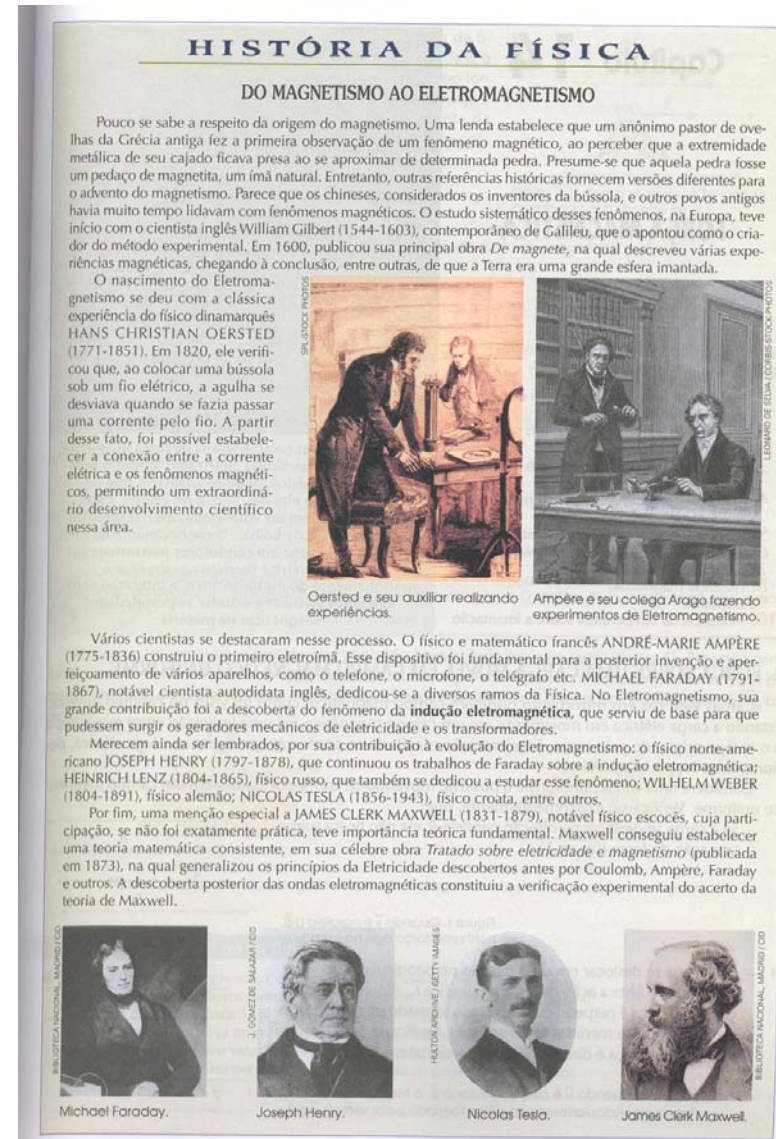
Divisão histórica:

- Magnetismo;
- Eletromagnetismo.

Breve história do eletromagnetismo

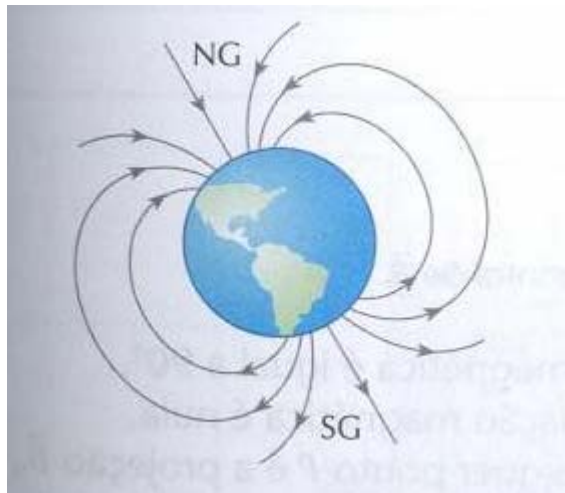


Experiência de Oersted em 1820

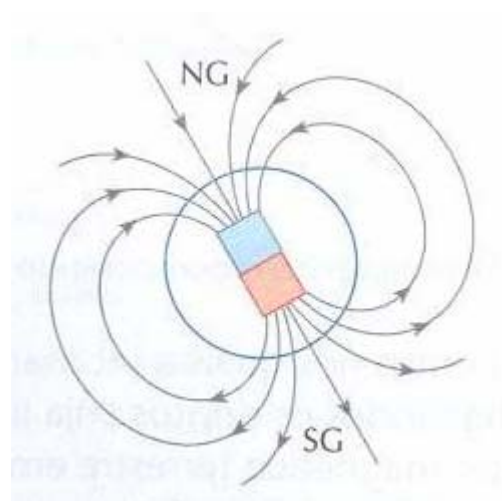


Conceitos iniciais

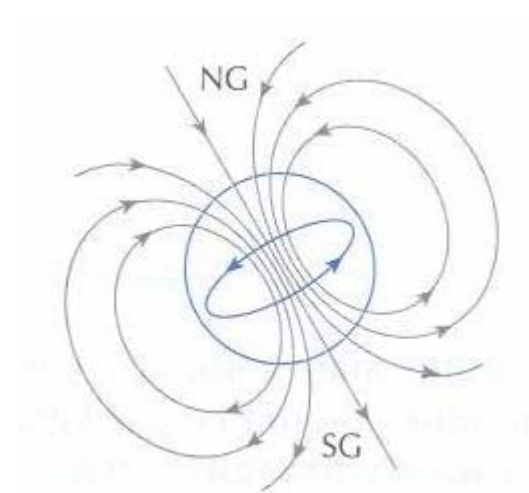
Magnetismo terrestre



Magnetismo terrestre



A terra como um ímã

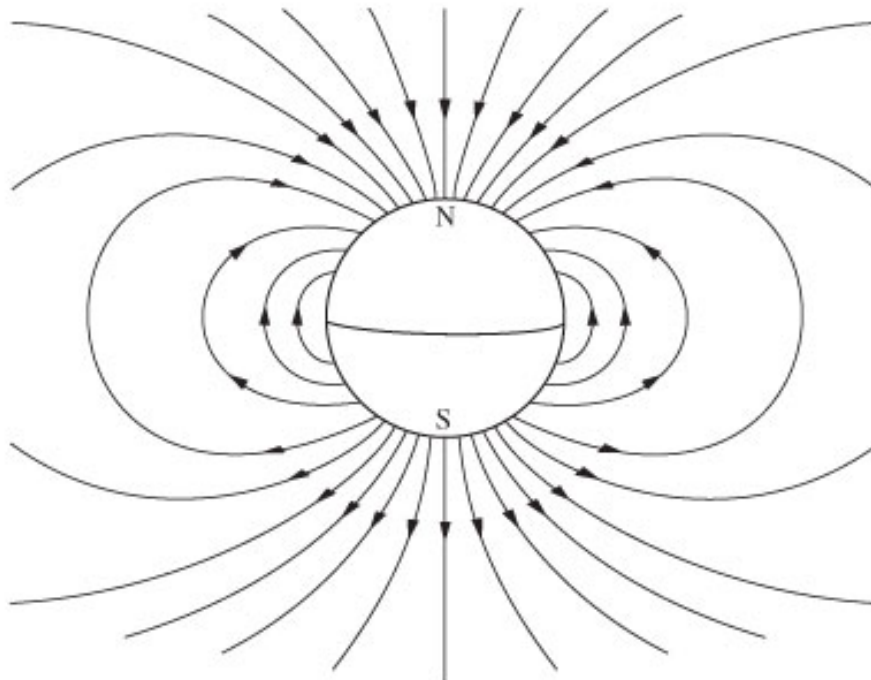


Explicação moderna

Conceitos iniciais

Dipolos magnéticos:

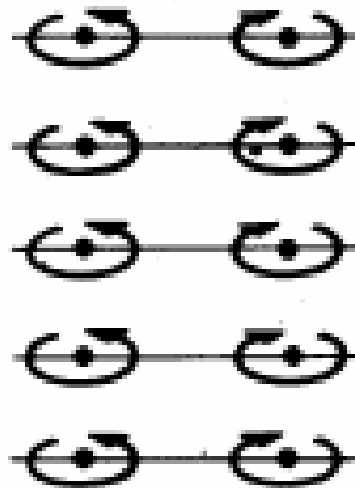
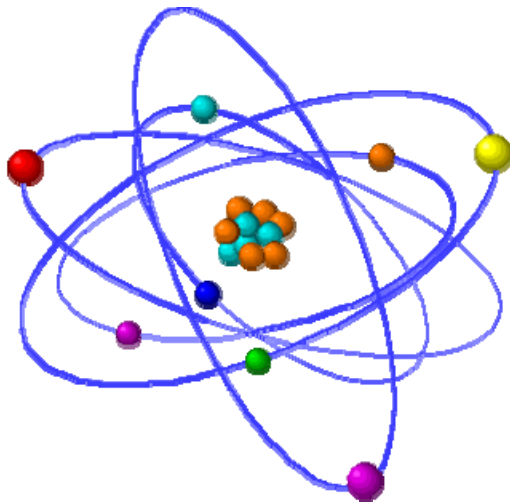
- Determinam o comportamento dos materiais num campo magnético;
- Tem origem no momentum angular dos elétrons nos íons ou átomos que formam a matéria.



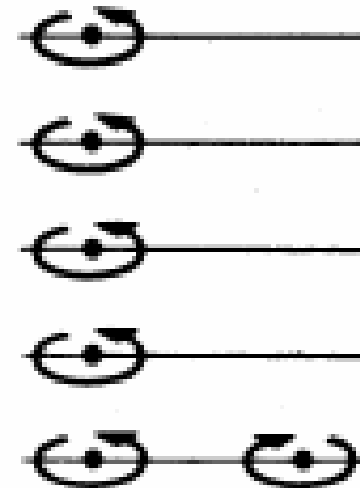
Conceitos iniciais

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

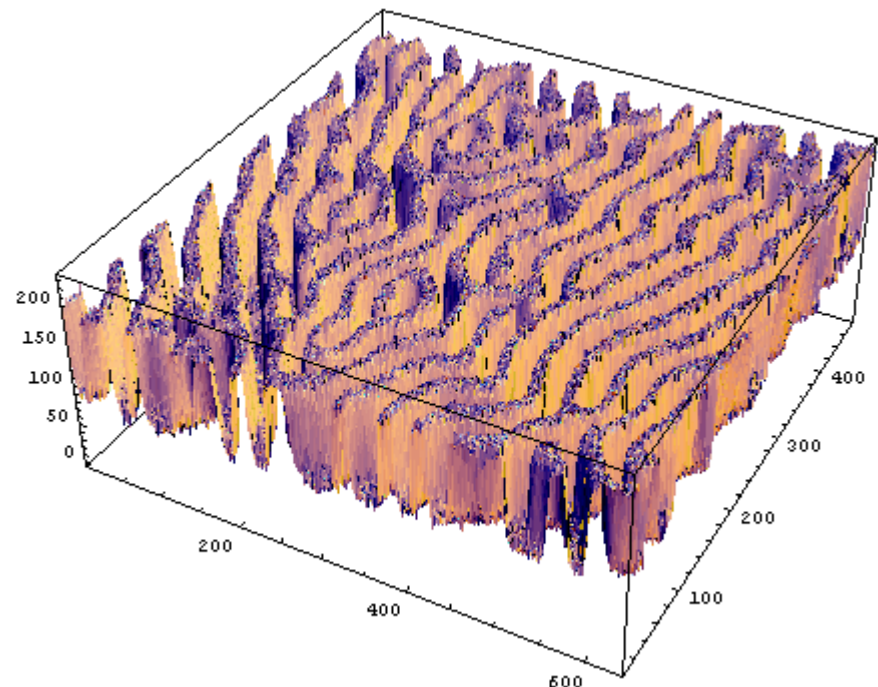
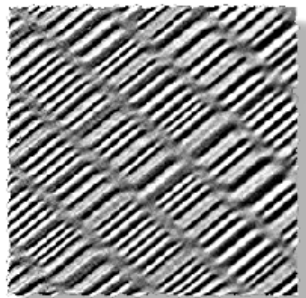
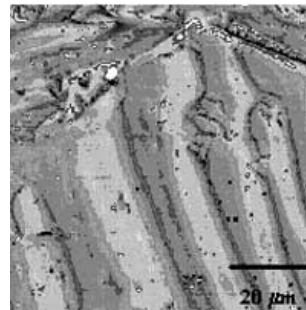
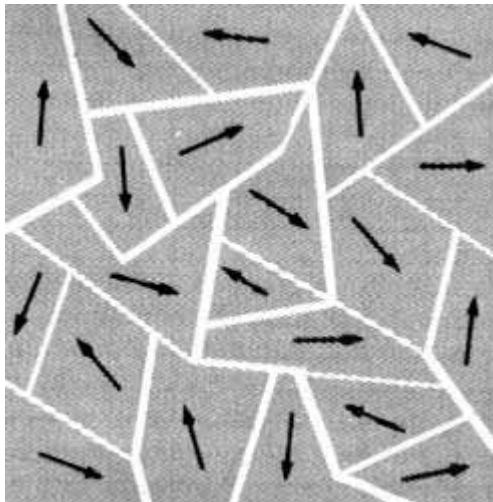


Momento $\neq 0$

Conceitos iniciais

Domínios magnéticos:

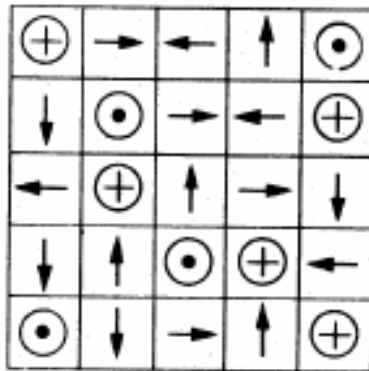
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



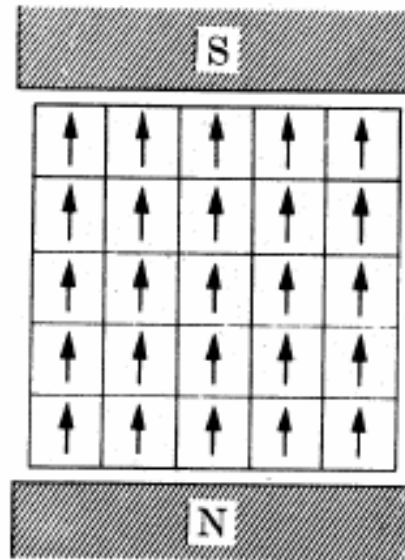
Conceitos iniciais

Alinhamento dos domínios:

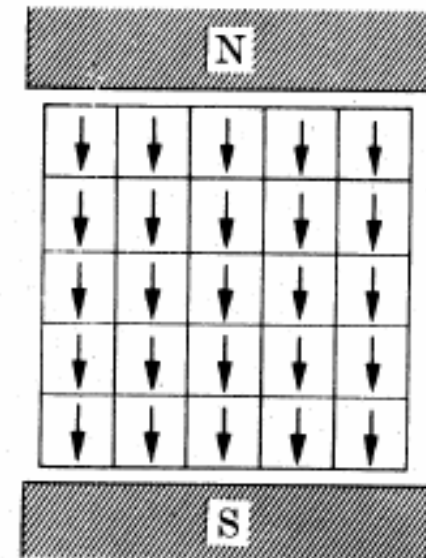
- Aplicando um campo magnético externo.



Desmagnetizado



Magnetizado

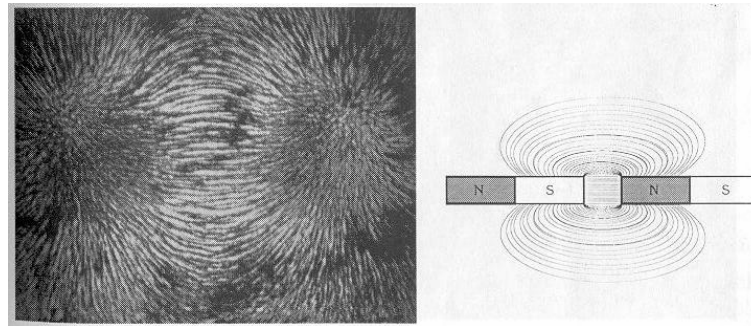


Magnetizado ao
contrário

Conceitos iniciais

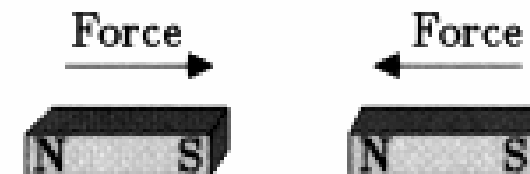
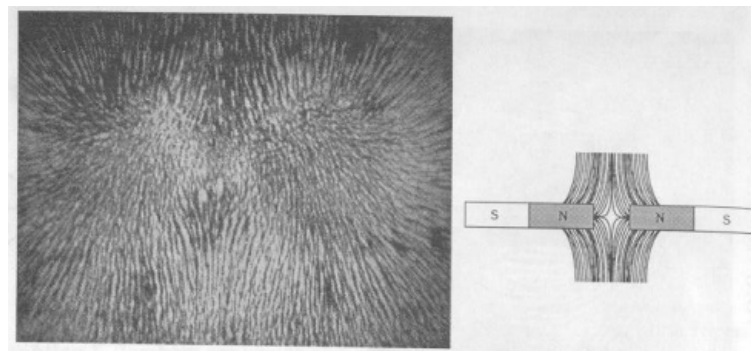
Forças de atração e repulsão magnéticas

Atração



Repulsion

Repulsão



Attraction

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

Parte 2

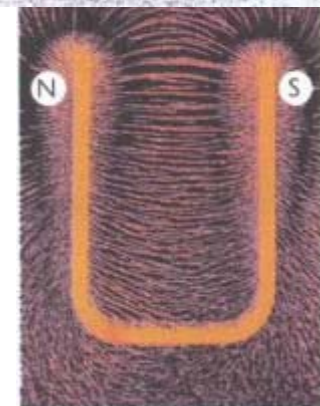
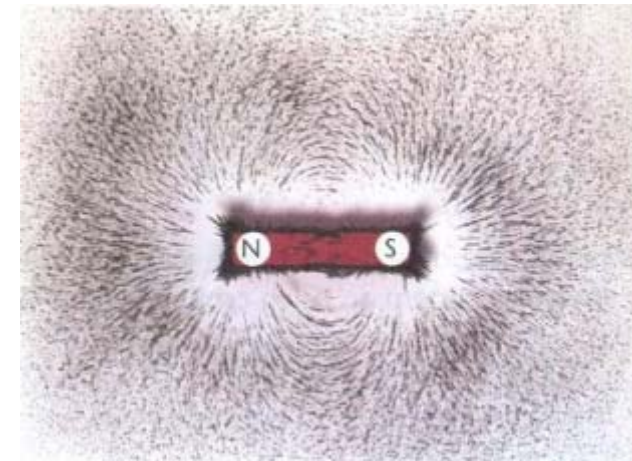
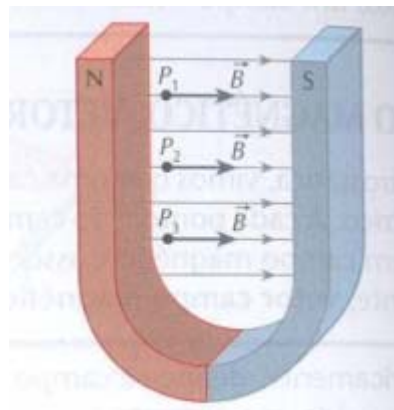
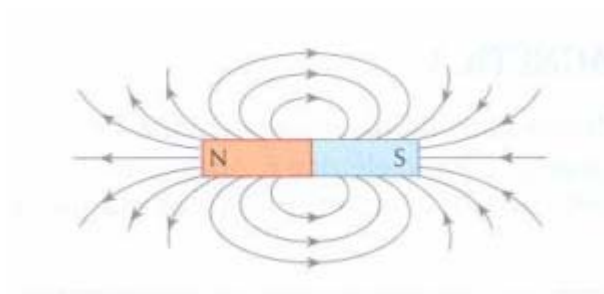
Campo Magnético

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.

Linhas de indução (ou de força)



Campo magnético uniforme:

- Vetor $\vec{B}$ tem mesmas direção, sentido e intensidade.

Vetor indução magnética

Vetor indução magnética:

Caracteriza cada ponto do campo magnético. Também chamado de vetor campo magnético.

$\vec{B}$

Unidade de medida: Tesla [T]

$$B = \mu \cdot H$$

B – intensidade do vetor indução magnética, em
tesla [T]

H – intensidade de campo magnético, em
ampères · espira/metro [Ae/m]

μ – permeabilidade magnética do meio em
tesla · metro/ampères · espira [Tm/Ae]

Permeabilidade magnética

Permeabilidade magnética:

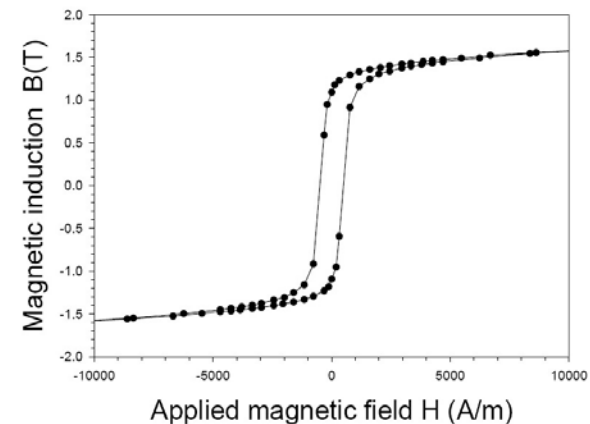
- Grau de magnetização de um material em resposta ao campo magnético;
- Facilidade de “conduzir” o fluxo magnético;
- Simbolizado pela letra μ .

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

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

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N / A}^2$$

Permeabilidade do vácuo



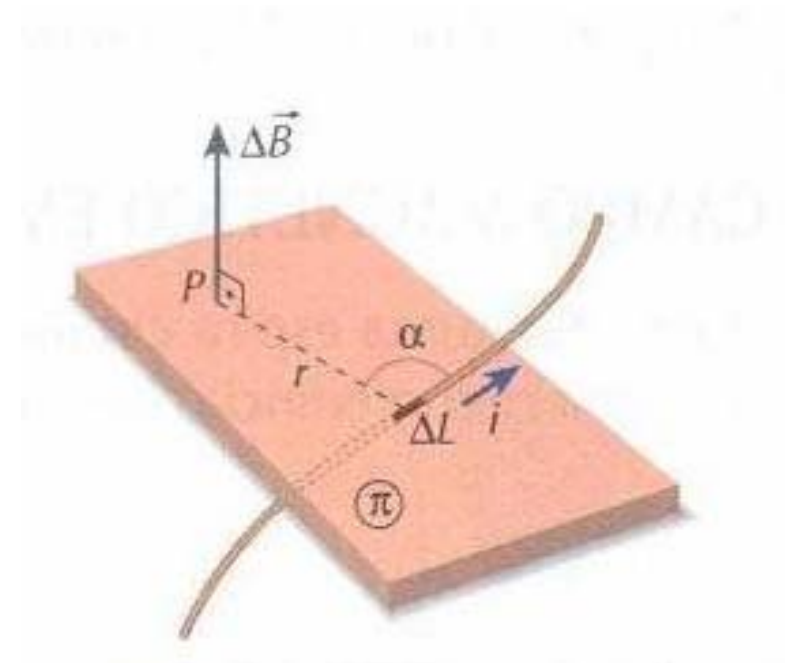
Campo magnético de correntes elétricas

Lei de Biot-Savart

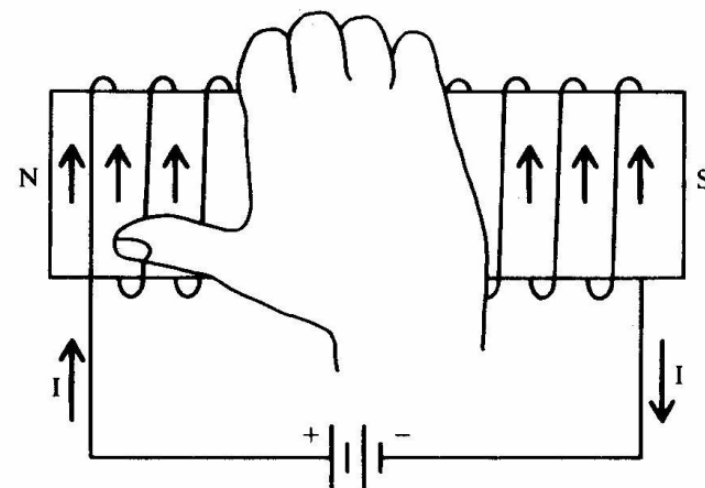
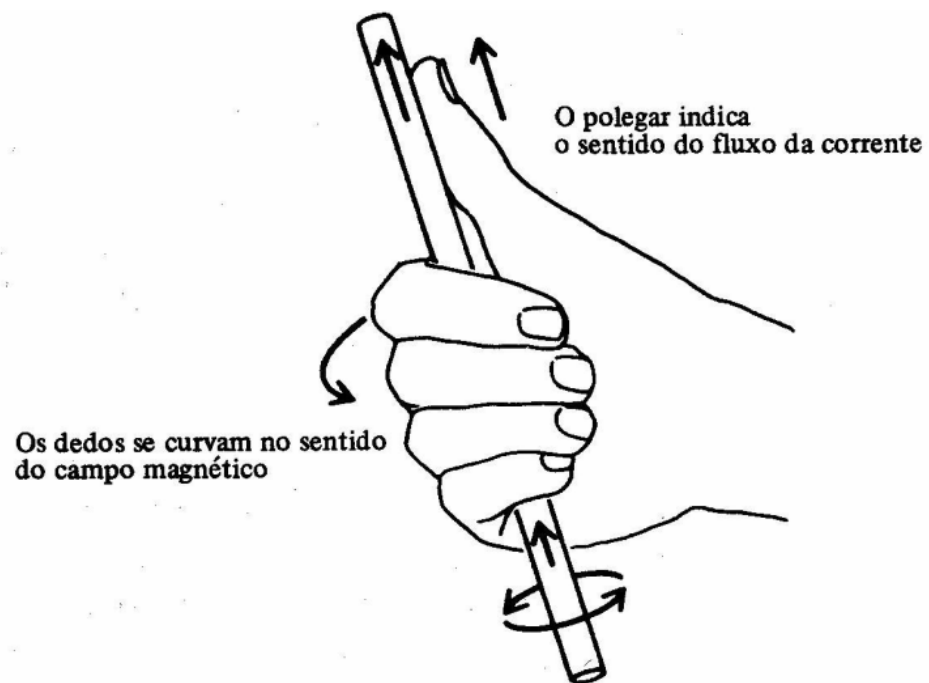
- A direção do vetor indução é perpendicular à corrente i ;
- Intensidade determinada por:

$$\Delta B = \frac{\mu_o \cdot i \cdot \Delta L \cdot \text{sen}(\alpha)}{4\pi \cdot r^2}$$

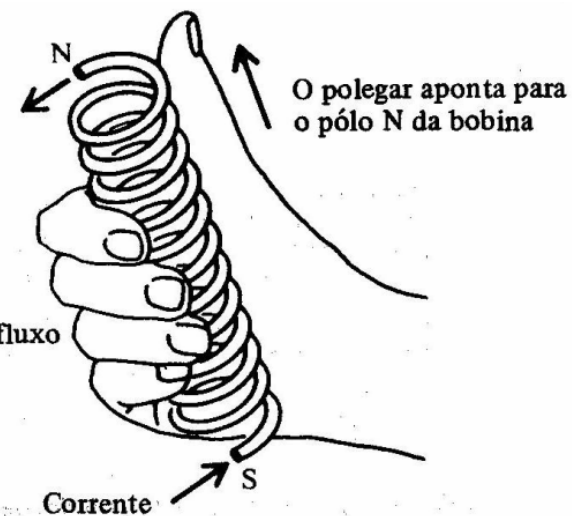
$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} / \text{A}^2$$



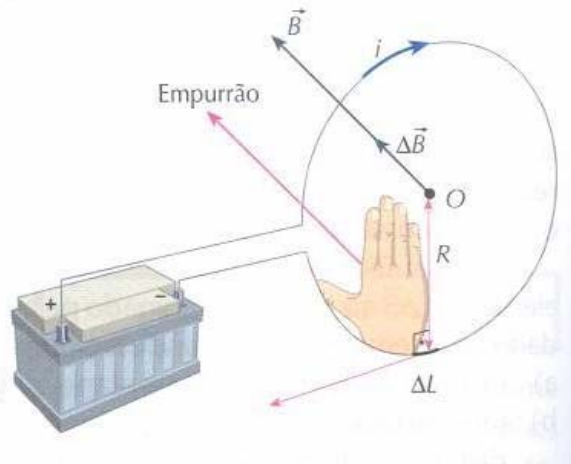
Regra da mão direita



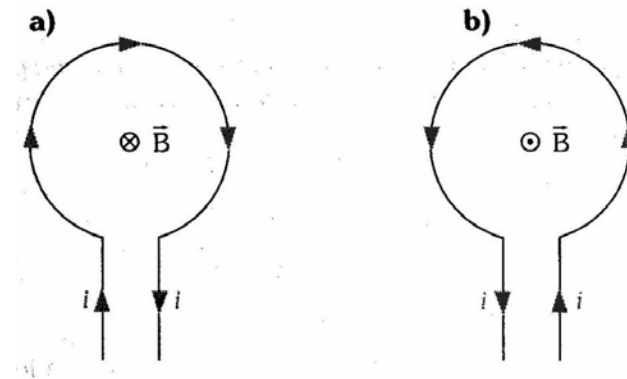
Os dedos indicam o sentido do fluxo da corrente através da bobina



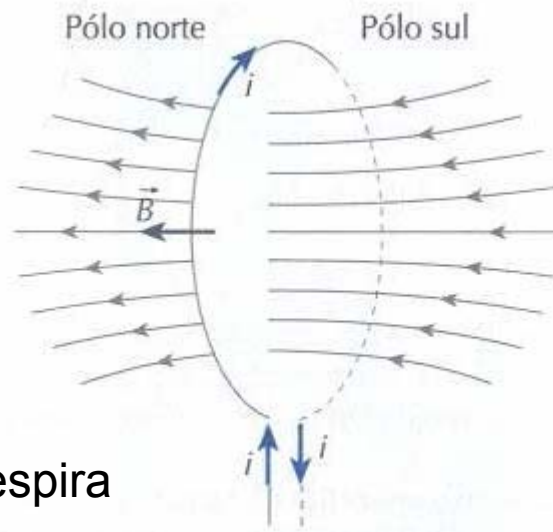
Campo magnético de uma espira circular



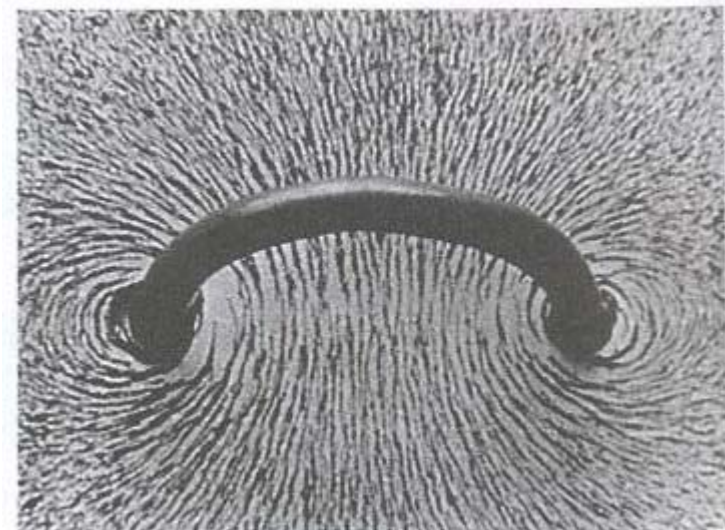
Circuito elétrico



Representação



Campo na espira



Visualização das linhas de força

Campo magnético de uma espira circular

$$\Delta B = \frac{\mu_o \cdot i \cdot \Delta L \cdot \text{sen}(\alpha)}{4\pi \cdot r^2}$$



$$\alpha = 90^\circ$$

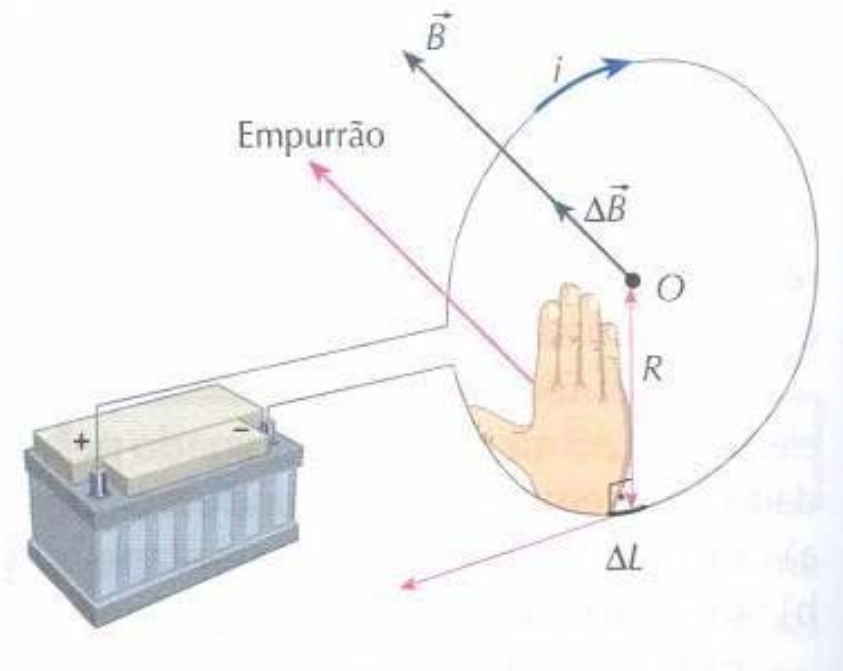


$$\Delta B = \frac{\mu_o \cdot i \cdot \Delta L}{4\pi \cdot R^2}$$

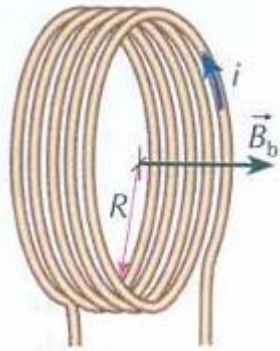


$$B = \frac{\mu_o \cdot i \cdot \sum \Delta L}{4\pi \cdot R^2} \rightarrow \sum \Delta L = 2\pi \cdot R \rightarrow$$

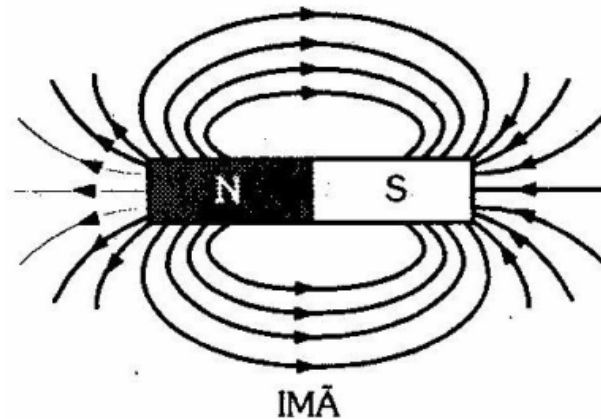
$$B = \frac{\mu_o}{2} \frac{i}{R}$$



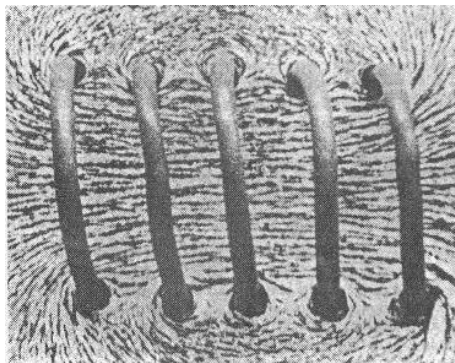
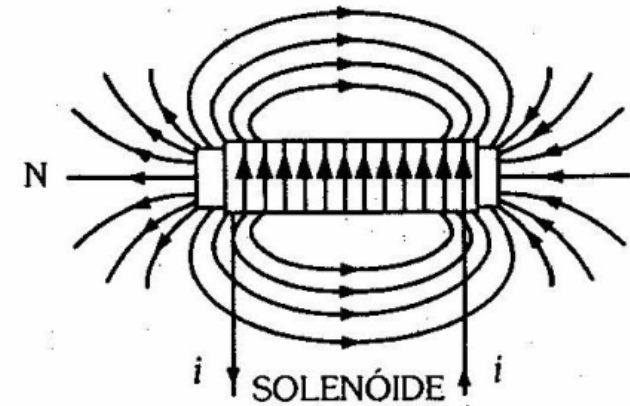
Campo magnético de uma bobina (solenóide)



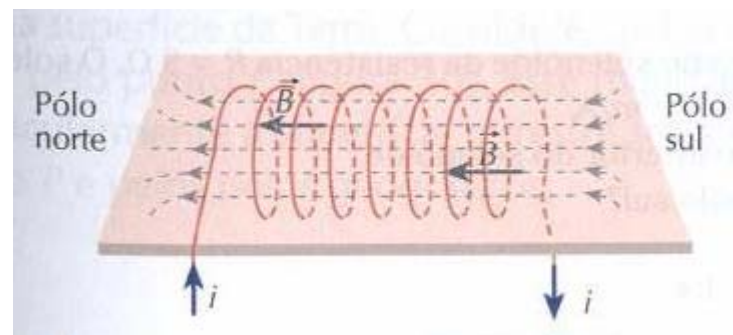
Bobina sem núcleo



Comportamento de imã

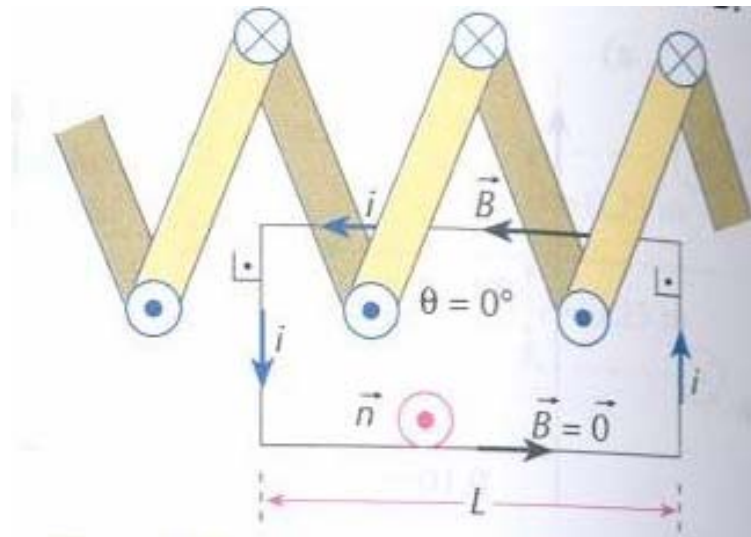


Visualização prática



Campo magnético do solenóide

Campo magnético de uma bobina/solenóide



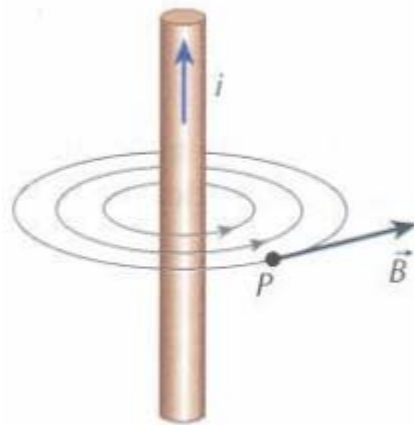
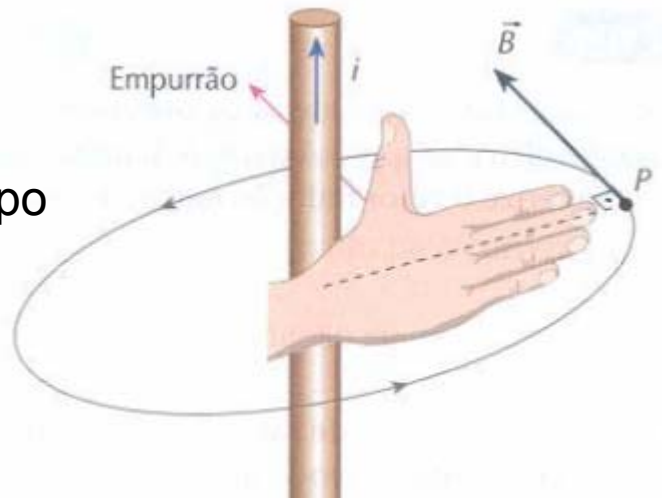
$$B = \frac{N \cdot \mu_o \cdot i}{L}$$

N - número de espiras (voltas)

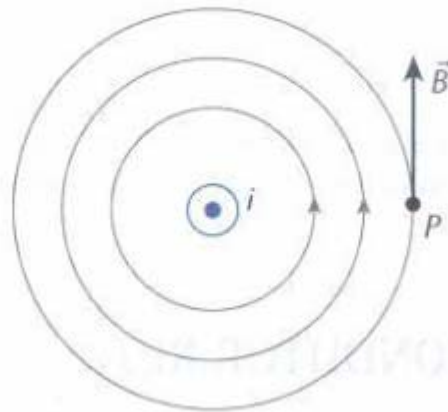
L – comprimento da bobina [m]

Campo magnético de um condutor reto

Caracterização do campo magnético



Campo gerado

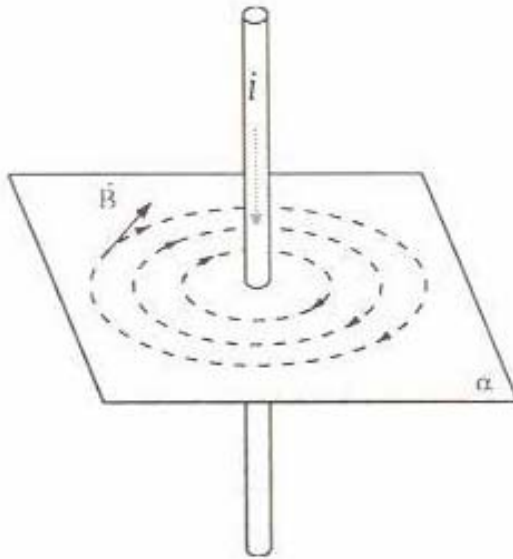


Vista superior

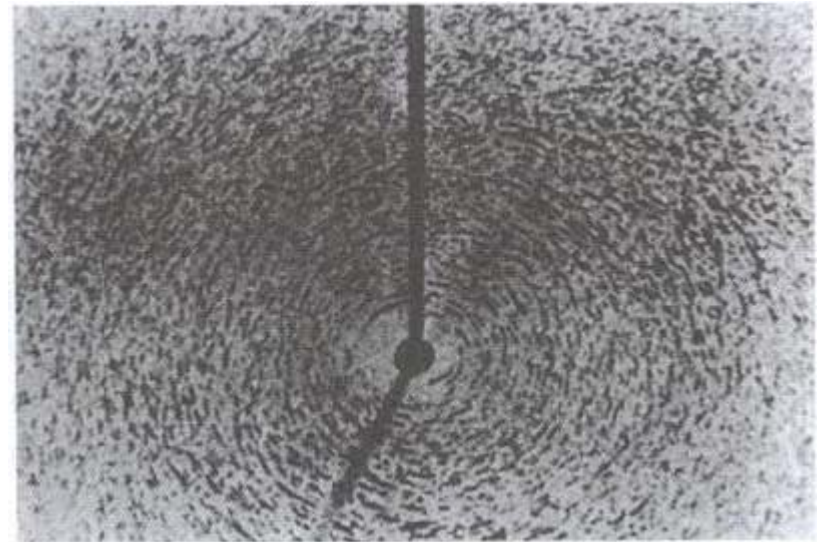


Vista lateral

Campo magnético de um condutor reto



Campo ao redor do condutor



Visualização das linhas de força

Em um ponto "P" →

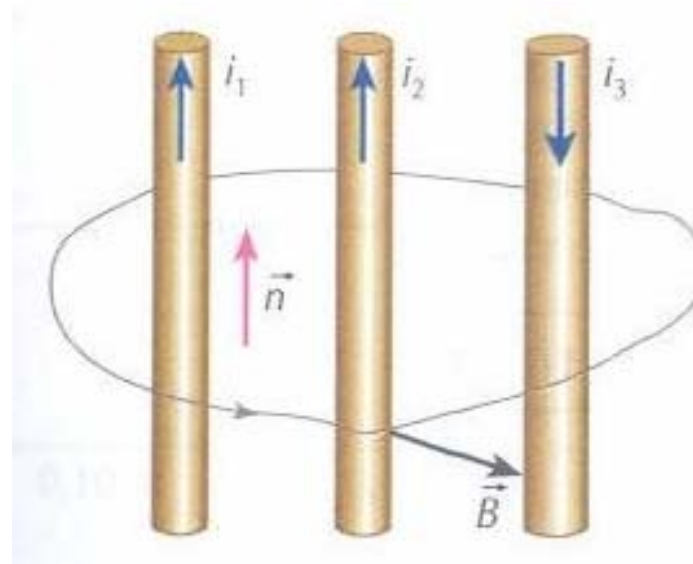
$$B = \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{i}{r}$$

Lei de Ampère

Definição:

A circulação do vetor $\vec{B}$ em um percurso fechado é proporcional à soma algébrica das intensidades das correntes elétricas enlaçadas pelo percurso.

A aplicação da Lei de Ampère facilita o cálculo de campos.



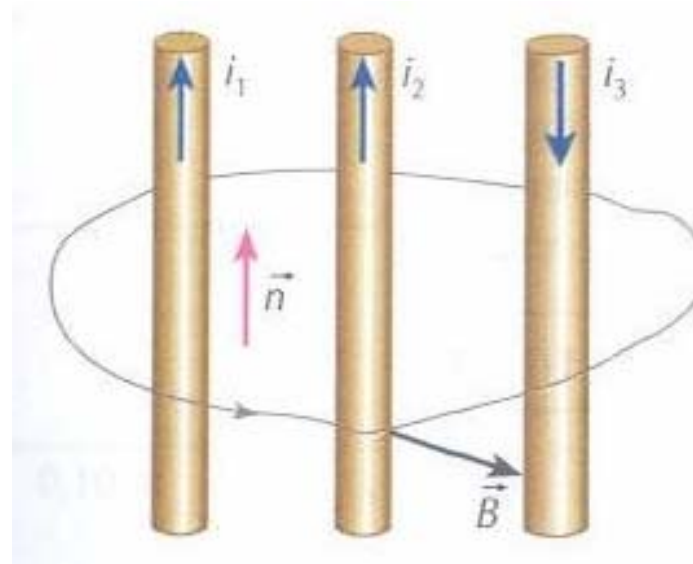
Percurso fechado enlaçando as correntes

Lei de Ampère

Definição:

A circulação do vetor $\vec{B}$ em um percurso fechado é proporcional à soma algébrica das intensidades das correntes elétricas enlaçadas pelo percurso.

A aplicação da Lei de Ampère facilita o cálculo de campos.

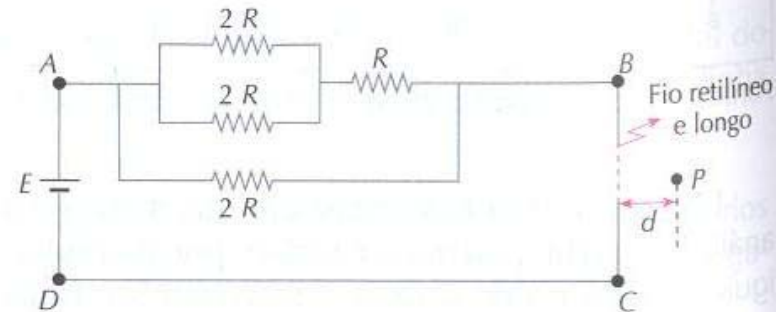


Percurso fechado enlaçando as correntes

Exercícios

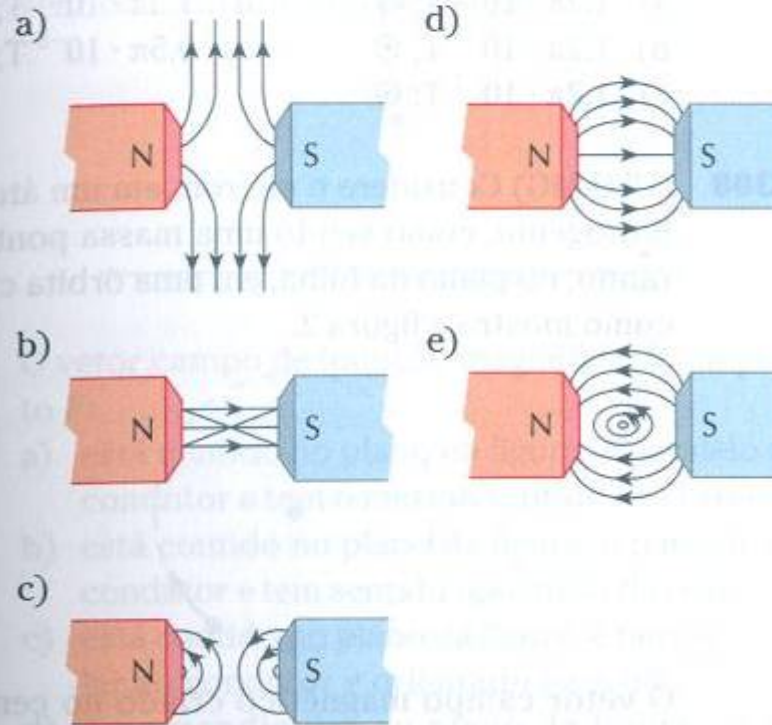
P.322 (UFG-GO) Considere o circuito abaixo. (Dados: $R = 3,0 \, \Omega$, $E = 12 \, \text{V}$, $d = 10 \, \text{cm}$ e $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$.)

- Calcule a corrente total no circuito.
- Admita que o comprimento do fio no trecho BC seja muito maior que a distância d entre o fio e o ponto P , ou seja, em relação ao ponto P , o fio pode ser considerado como retilíneo e longo. Calcule o campo magnético nesse ponto, devido somente ao trecho BC .



Exercícios

1.293 (UFV-MG) Assinale o diagrama que melhor representa as linhas de indução magnética criadas entre os ímãs.



Exercícios

T.297 (PUC-SP) Na experiência de Oersted, o fio de um circuito passa sobre a agulha de uma bússola. Com a chave C aberta, a agulha alinha-se como mostra a figura 1. Fechando-se a chave C, a agulha da bússola assume nova posição (figura 2).

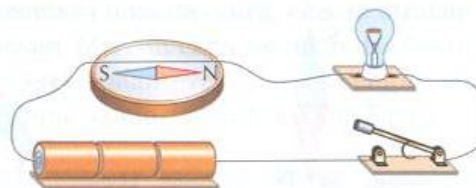


Figura 1

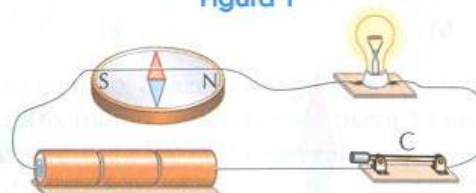


Figura 2

A partir desse experimento, Oersted concluiu que a corrente elétrica estabelecida no circuito:

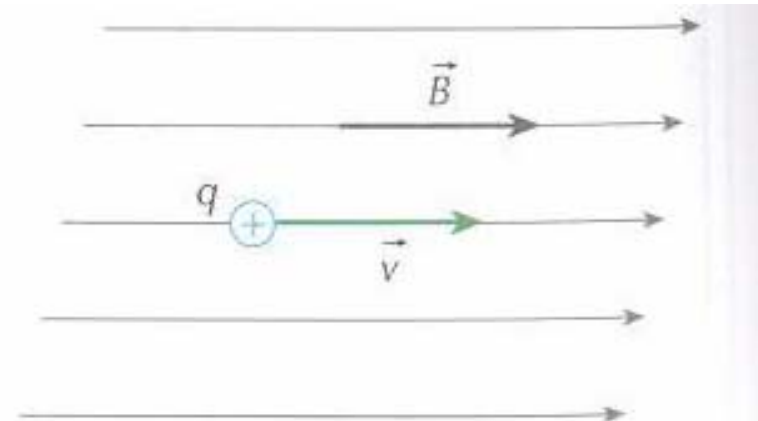
- a) gerou um campo elétrico numa direção perpendicular à da corrente.
- b) gerou um campo magnético numa direção perpendicular à da corrente.
- c) gerou um campo elétrico numa direção paralela à da corrente.
- d) gerou um campo magnético numa direção paralela à da corrente.
- e) não interfere na nova posição assumida pela agulha da bússola, que foi causada pela energia térmica produzida pela lâmpada.

Parte 3

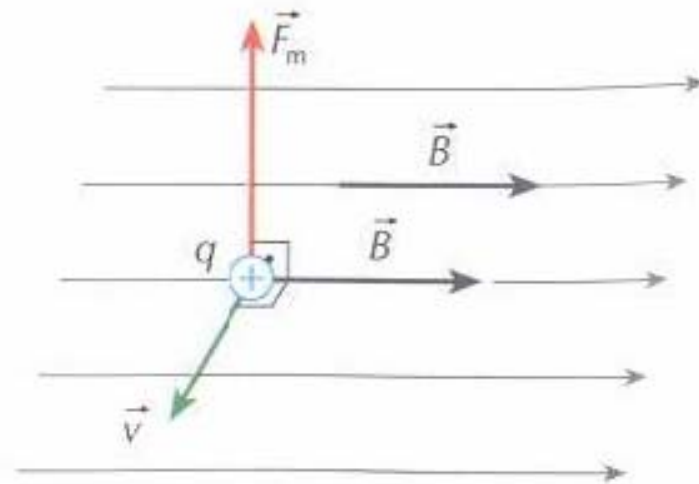
Força Magnética

Força magnética sobre uma carga móvel

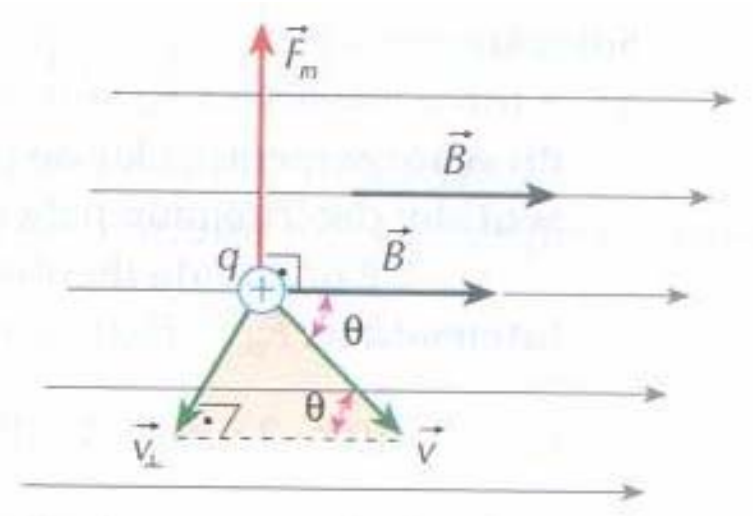
$\mathbf{v}$ é paralelo a $\mathbf{B}$, nenhuma força age



$\mathbf{v}$ é perpendicular a $\mathbf{B}$, $\mathbf{F}$ age perpendicularmente ao plano de $\mathbf{v}$ e $\mathbf{B}$.



Força magnética sobre uma carga móvel



$$F = B \cdot q \cdot v \cdot \sin(\theta)$$

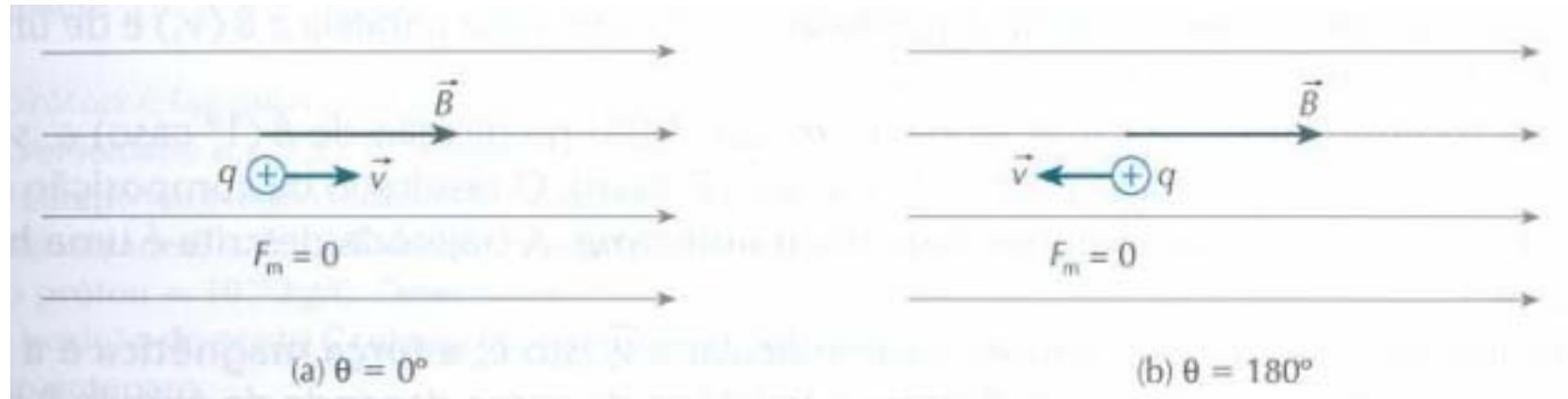
F – força magnética agente na carga, em newtons [N]

B – indução magnética, [T]

q – valor da carga elétrica, em coulombs [C]

v – velocidade da carga elétrica em [m/s]

Movimento de uma carga em um campo magnético



v e B são paralelos

$$F = B \cdot q \cdot v \cdot \text{sen}(\theta)$$

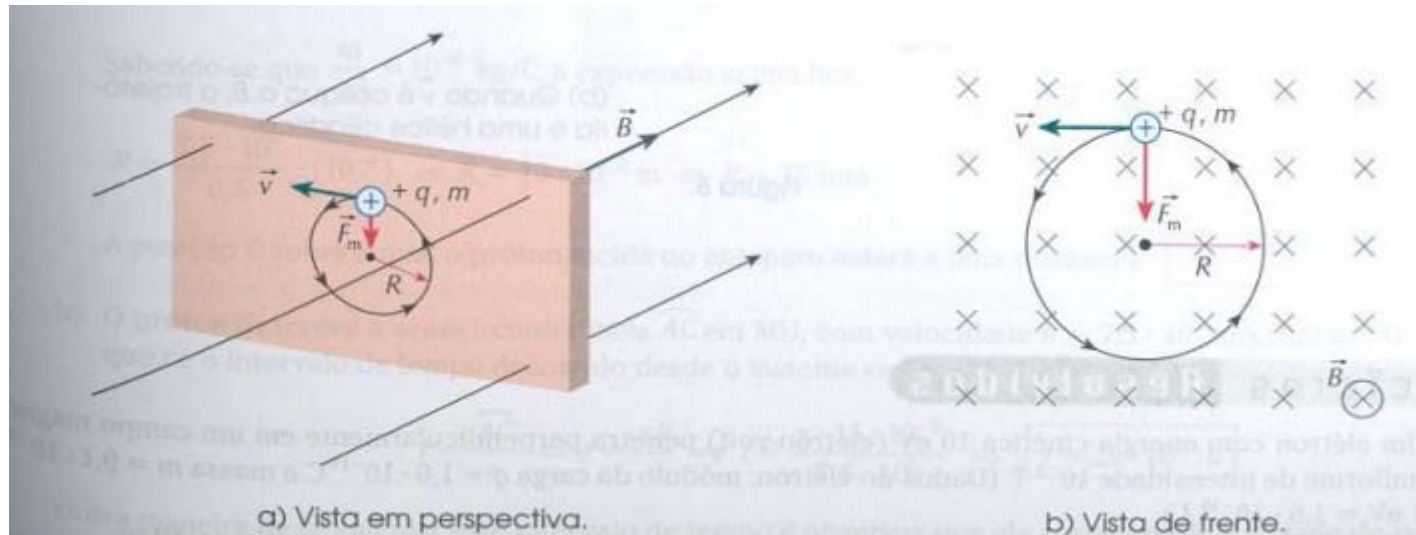


$$\theta = 0^\circ \text{ ou } \theta = 180^\circ \rightarrow \text{sen}(\theta) = 0$$

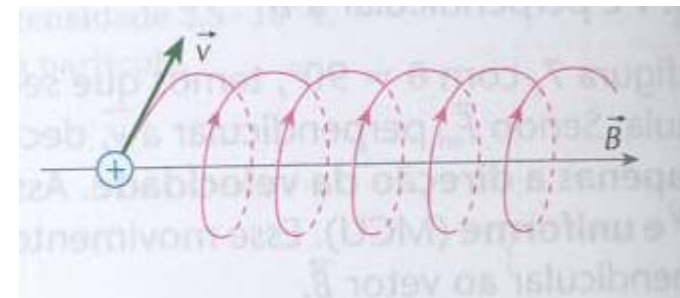


$$F = B \cdot q \cdot v \cdot 0 = 0$$

Movimento de uma carga em um campo magnético

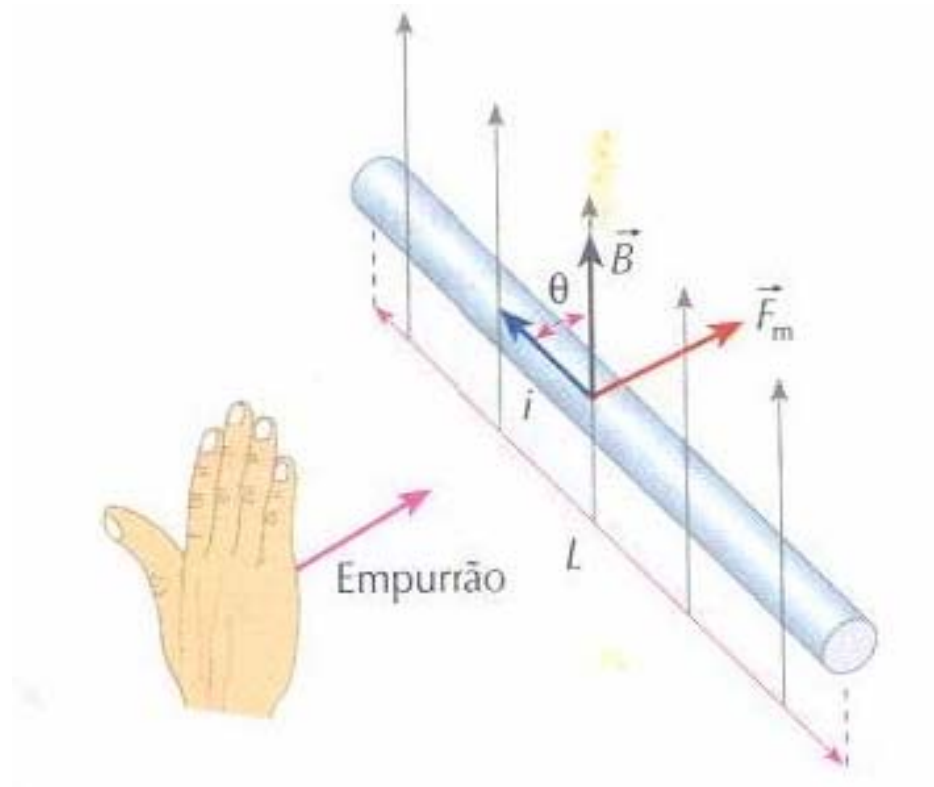


$\vec{v}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares



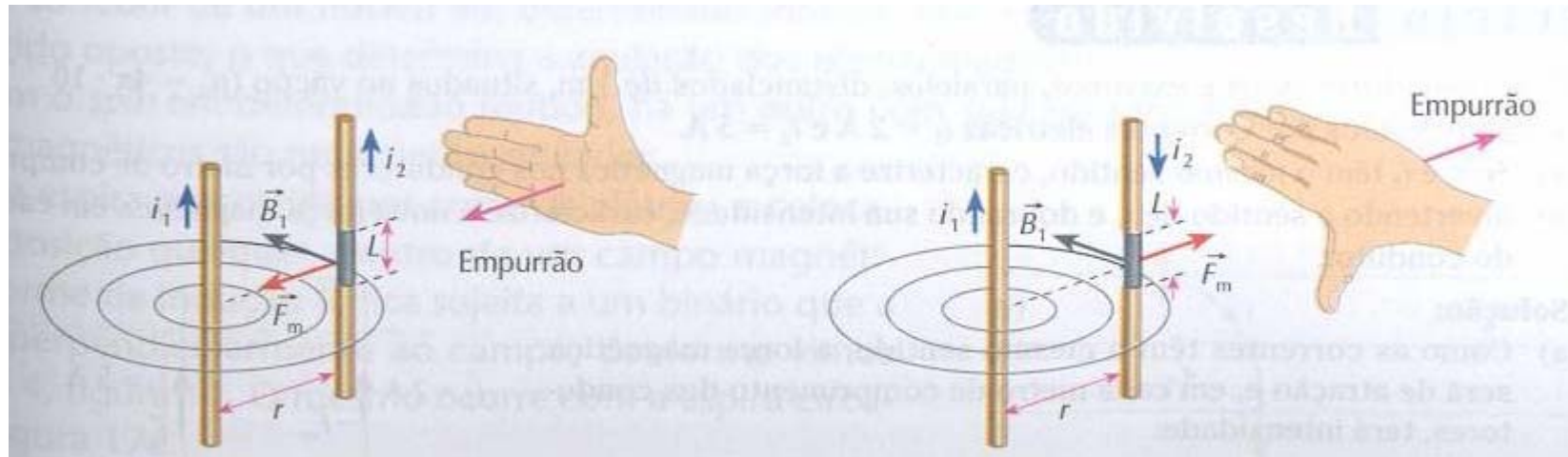
$\vec{v}$ é oblíquo a $\vec{B}$

Força sobre um condutor reto em um campo



$$F = B \cdot i \cdot L \cdot \text{sen}(\theta)$$

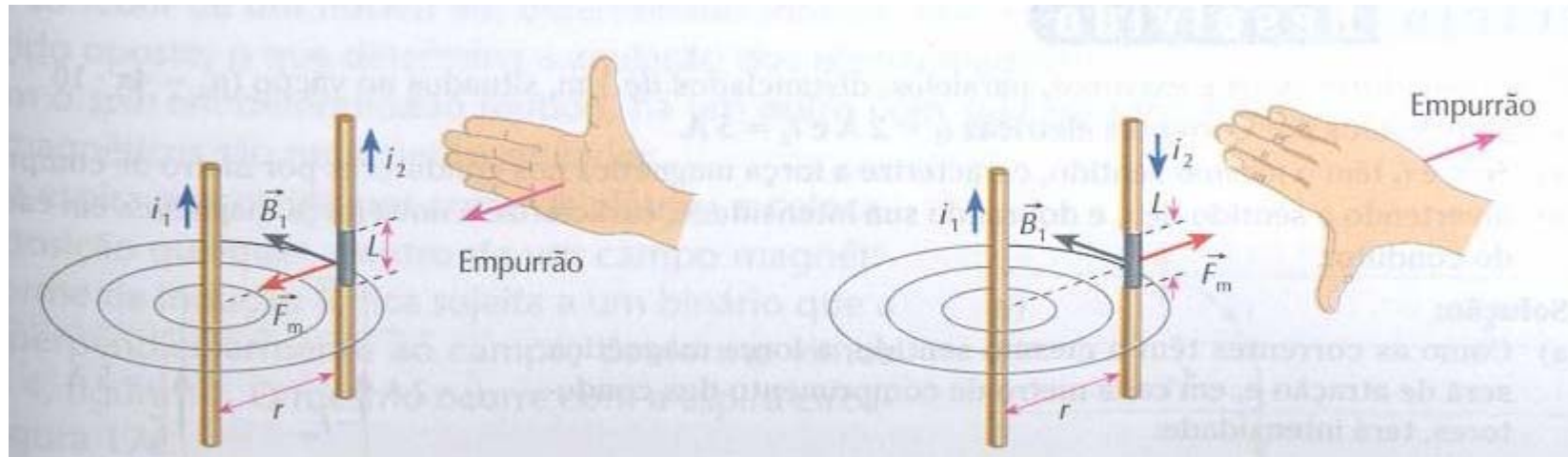
Força magnética entre condutores paralelos



$$F_m = \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{r} \cdot L$$

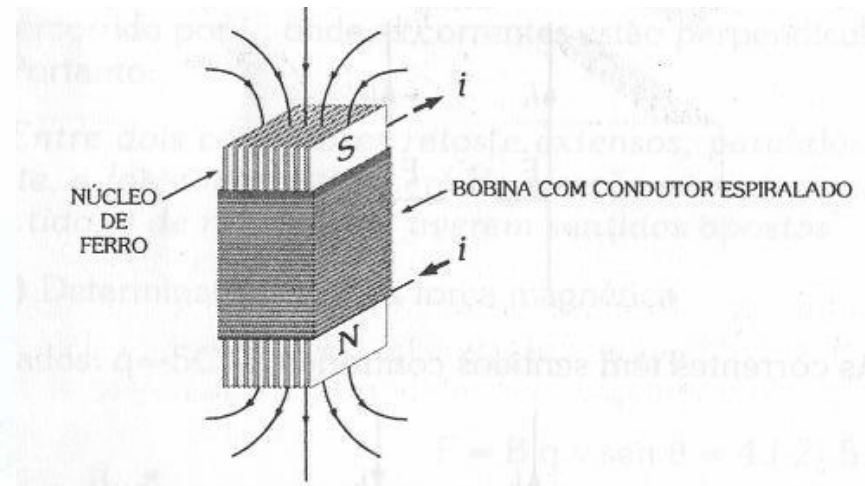
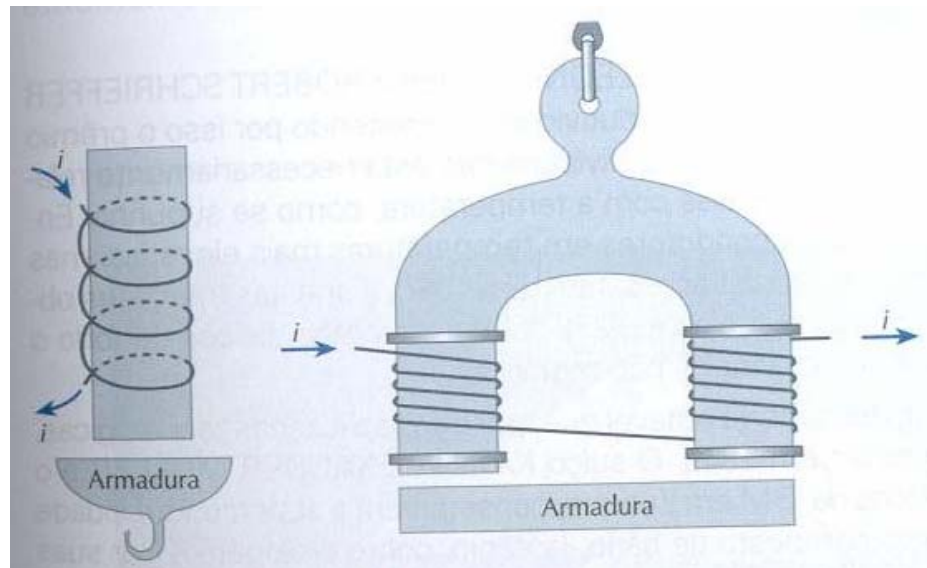
Entre dois condutores retos e extensos, paralelos e percorridos por correntes, a força magnética será de atração, se as correntes tiverem o mesmo sentido, e de repulsão, se tiverem sentidos opostos.

Força magnética entre condutores paralelos



$$F_m = \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{r} \cdot L$$

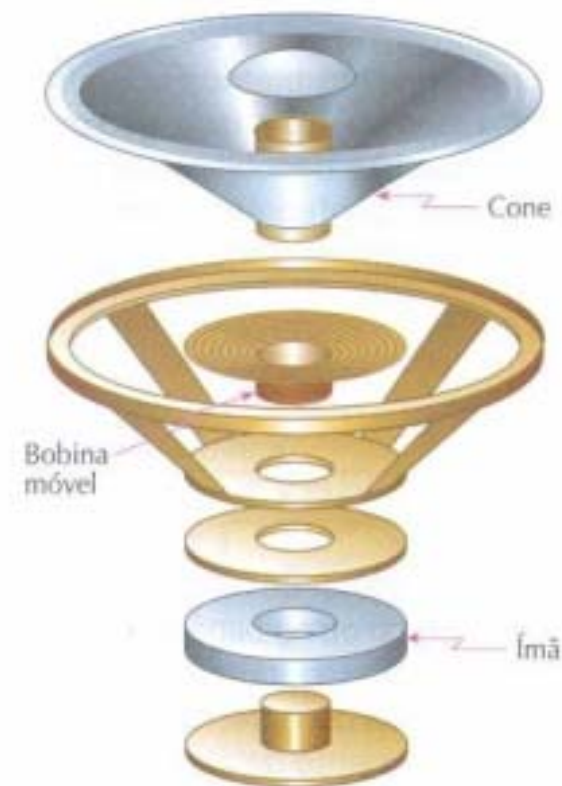
Aplicações práticas - Eletroímã



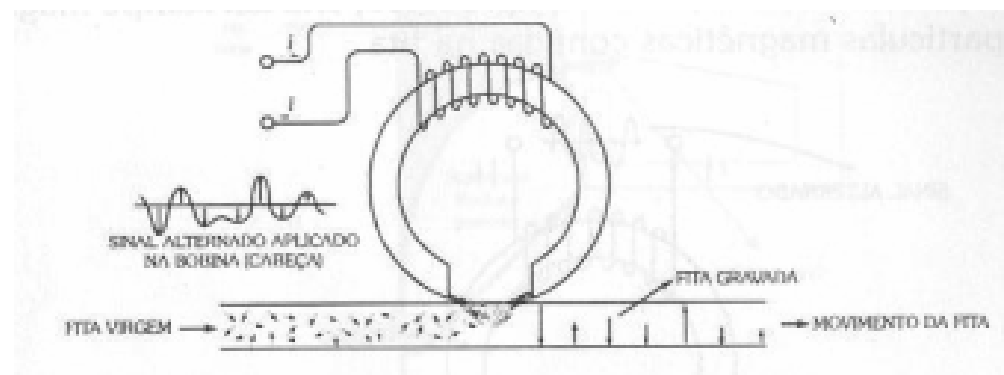
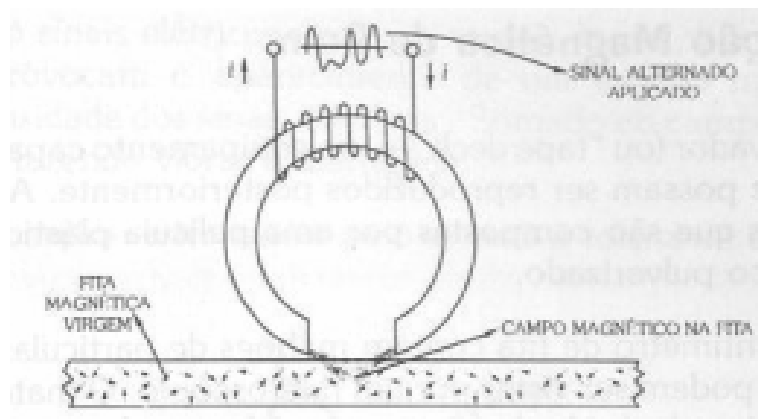
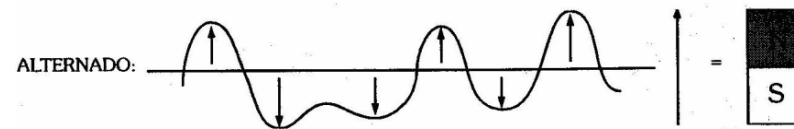
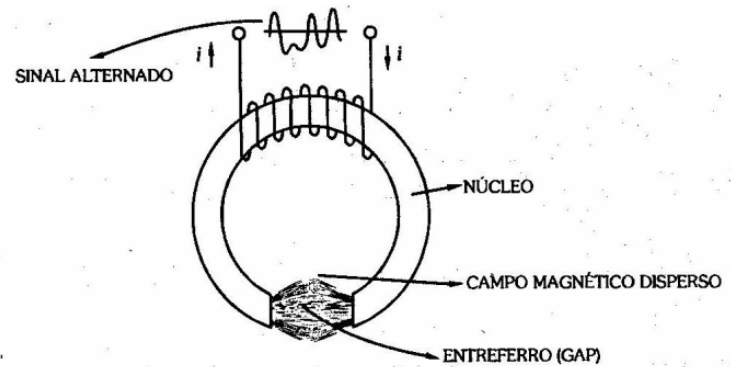
Eletroímã Circular



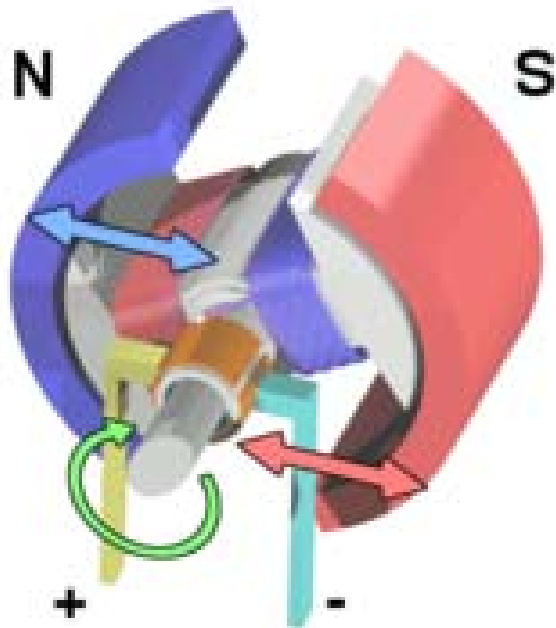
Aplicações práticas – Alto-falante



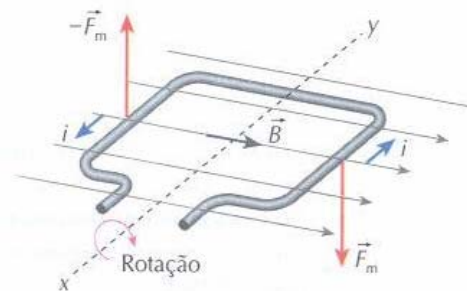
Aplicações práticas – Gravação magnética



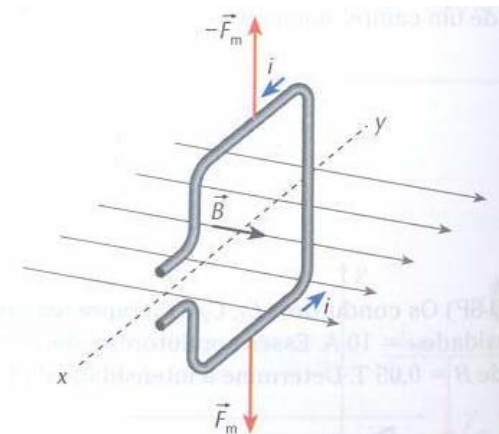
Aplicações práticas – Motor de CC



Construção de um motor CC



Momento de rotação máximo.

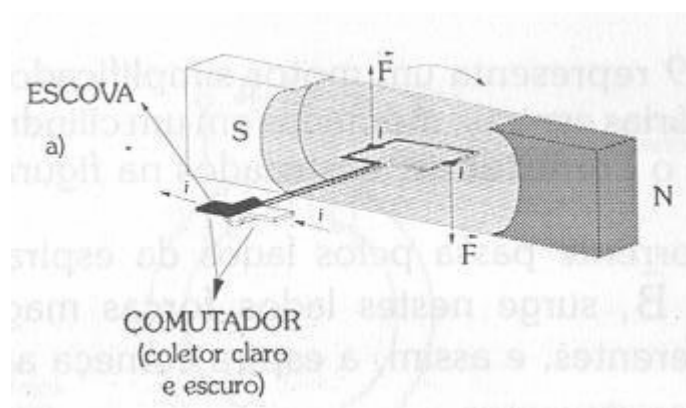
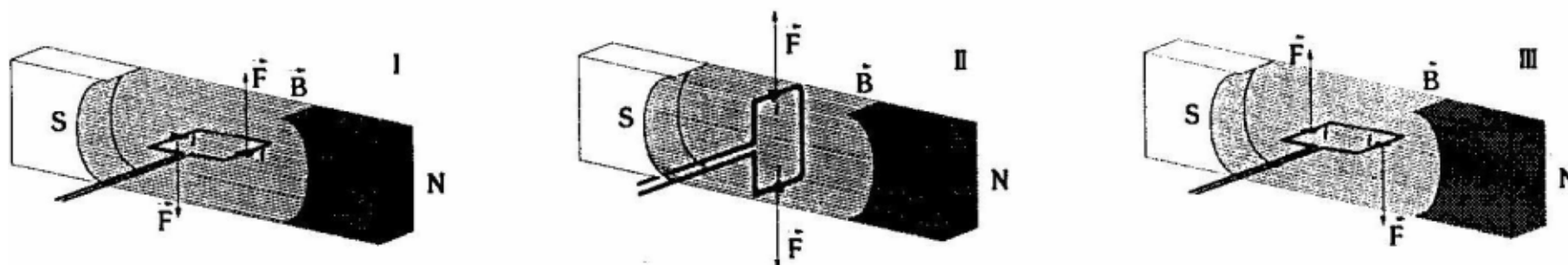


Momento de rotação nulo.

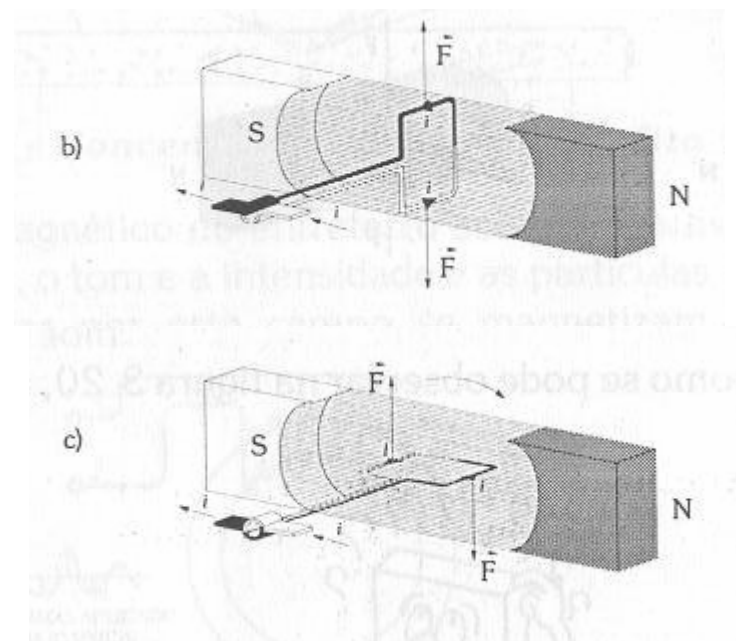
Funcionamento dos motores de CC

Aplicações práticas – Motor de CC

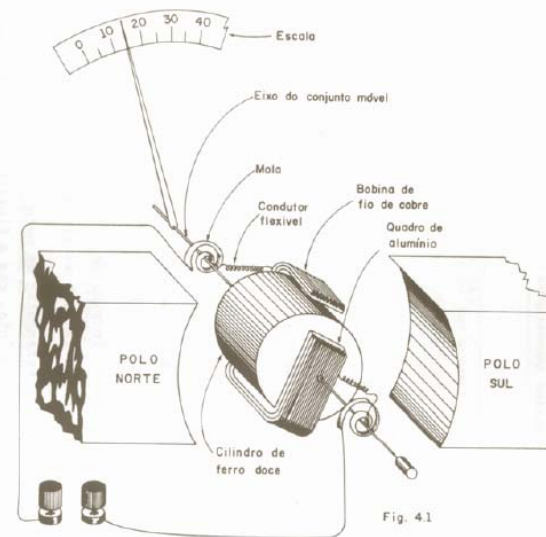
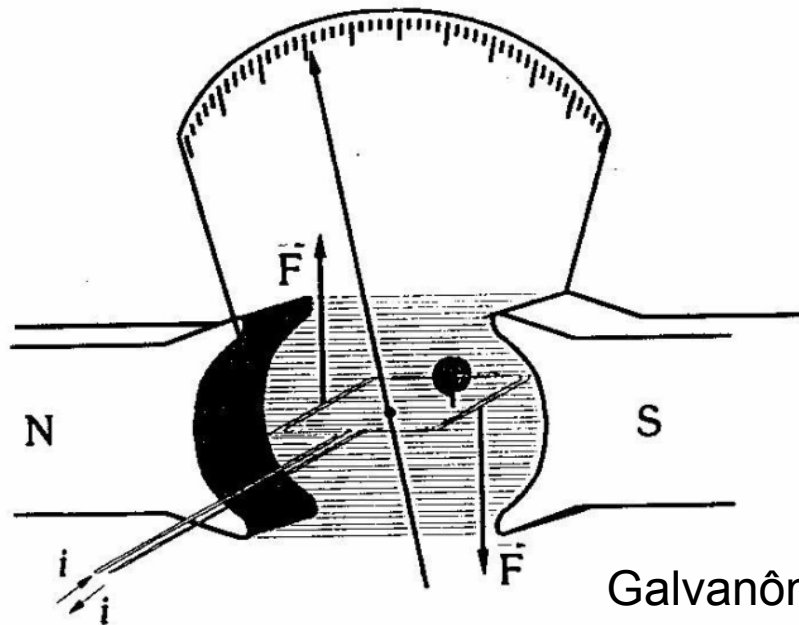
Forças num motor de CC



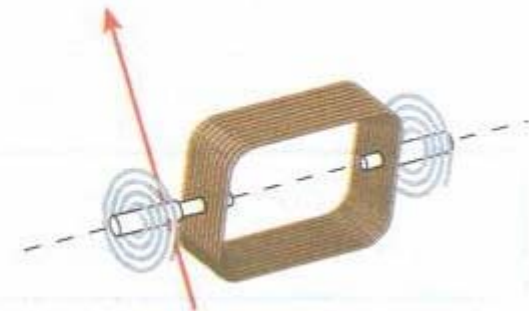
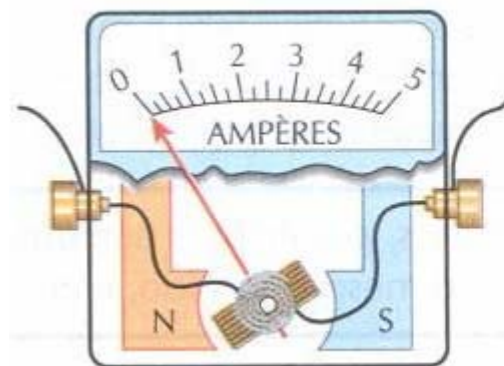
Funcionamento do motor CC



Aplicações práticas – Galvanômetro de bobina móvel

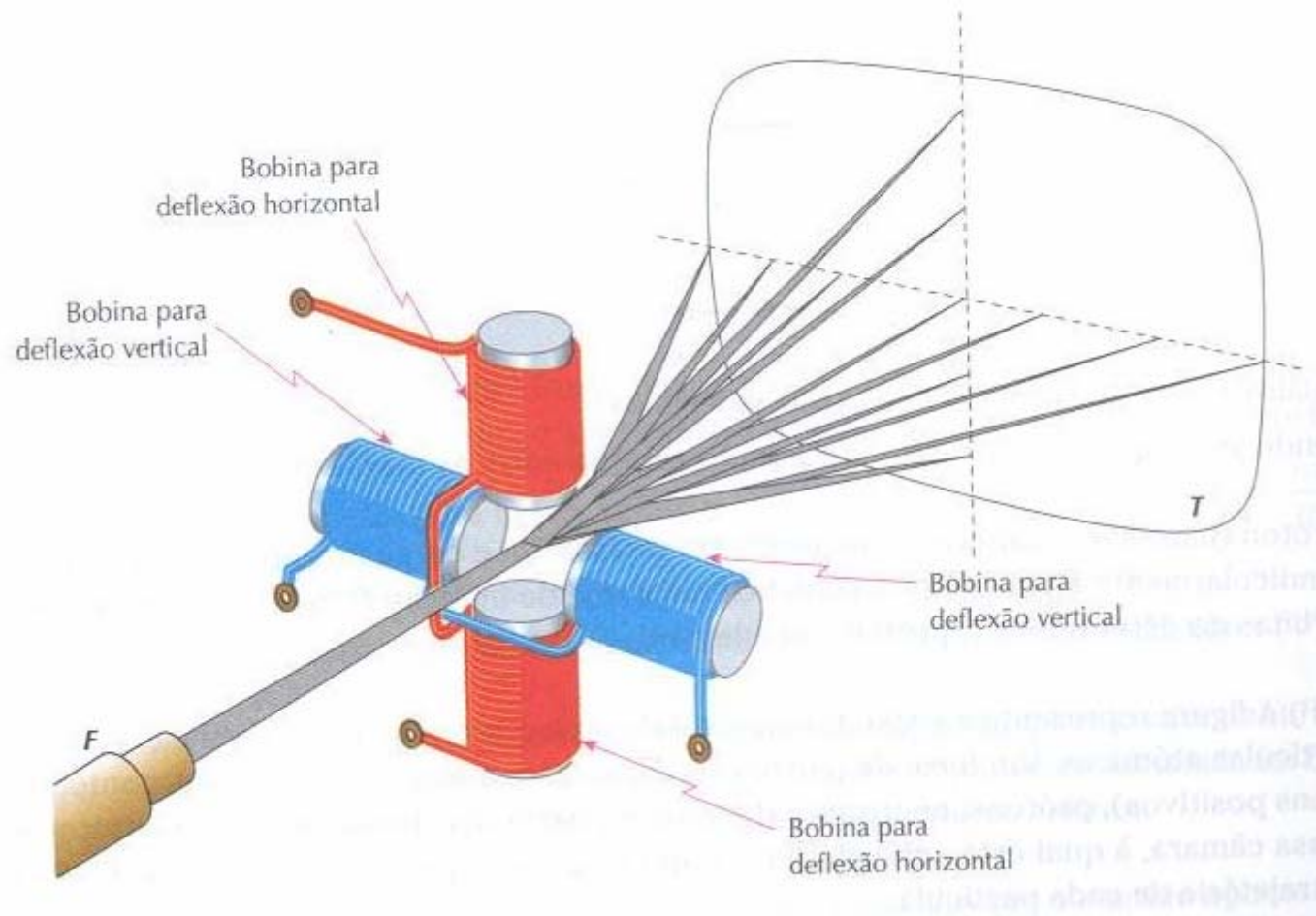


Galvanômetros de CC



Amperímetro analógico

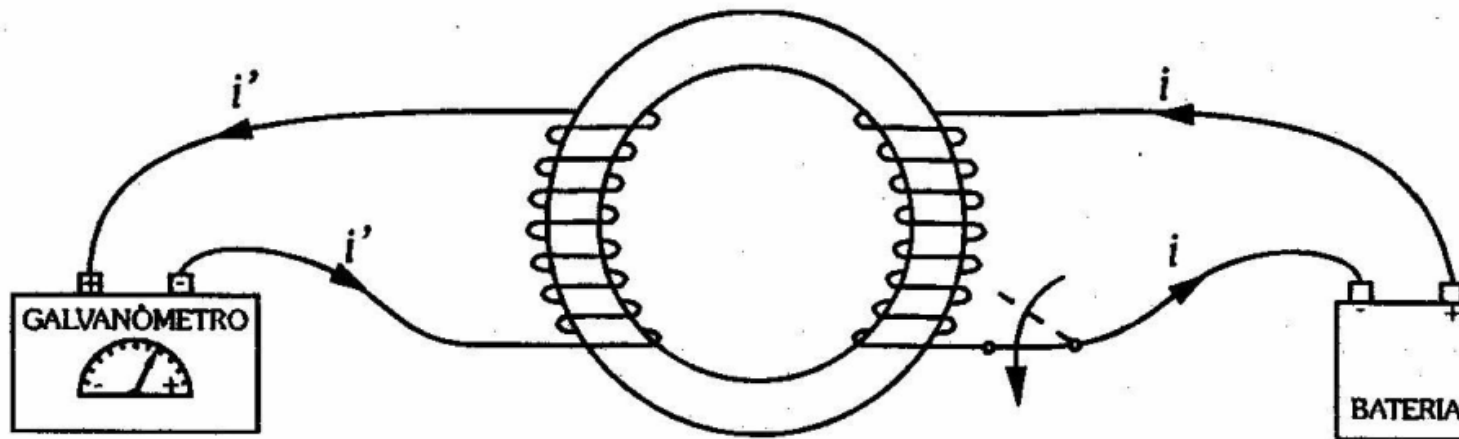
Aplicações práticas – Tubo de raios catódicos



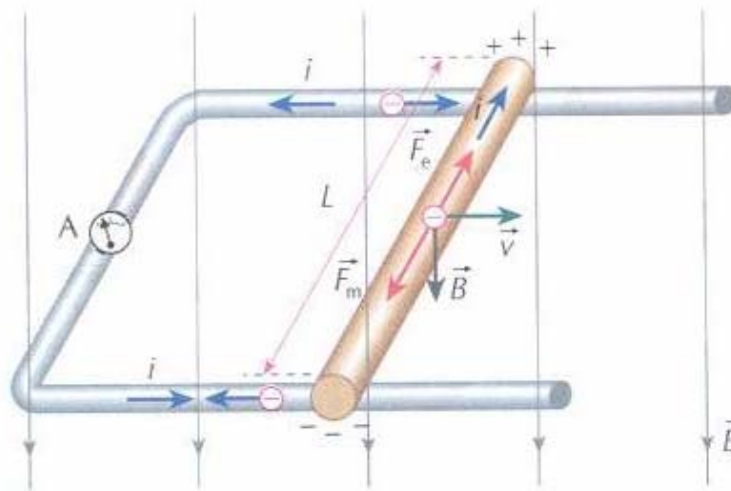
Parte 4

Indução Eletromagnética

Corrente induzida



Experiência de Faraday

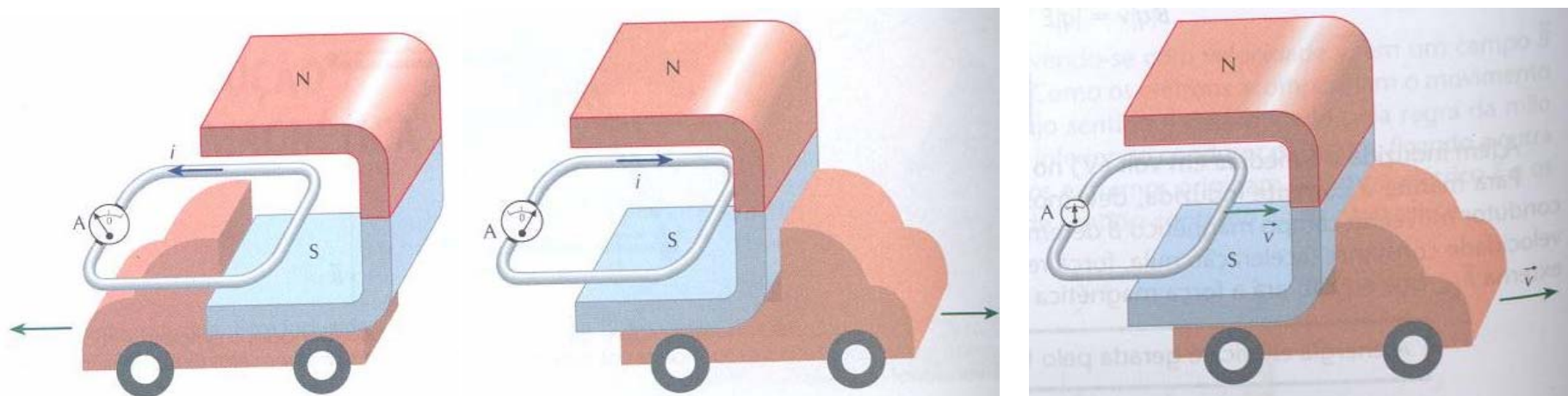
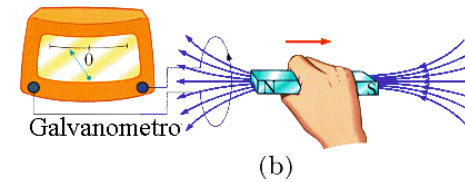
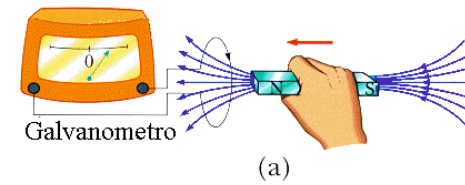
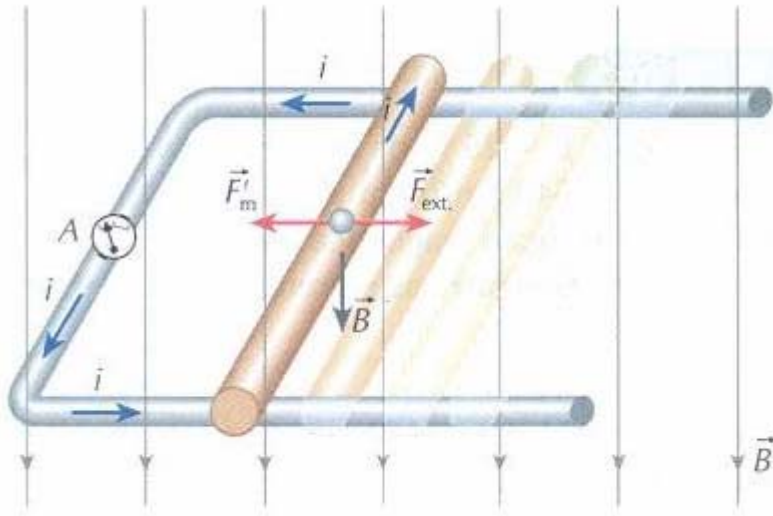


$$e = B \cdot L \cdot v \quad \text{em volts [V]}$$

A energia elétrica é gerada pelo trabalho realizado por um agente externo

Corrente induzida

Para se obter corrente induzida num condutor, é importante o movimento relativo entre o circuito e o campo magnético.



Necessidade do movimento relativo

Fluxo magnético

Definição:

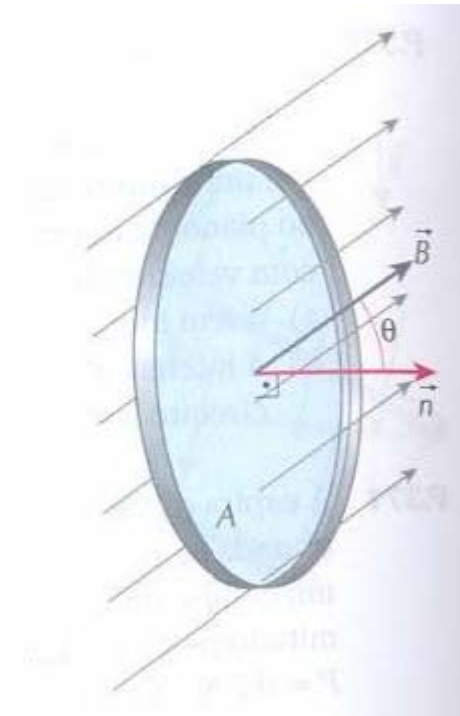
Quantidade de linhas de indução que atravessam a área A de uma espira imersa num campo magnético de indução B .

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos(\theta)$$

Φ – fluxo magnético, em weber [Wb]

B – indução magnética, em tesla [T]

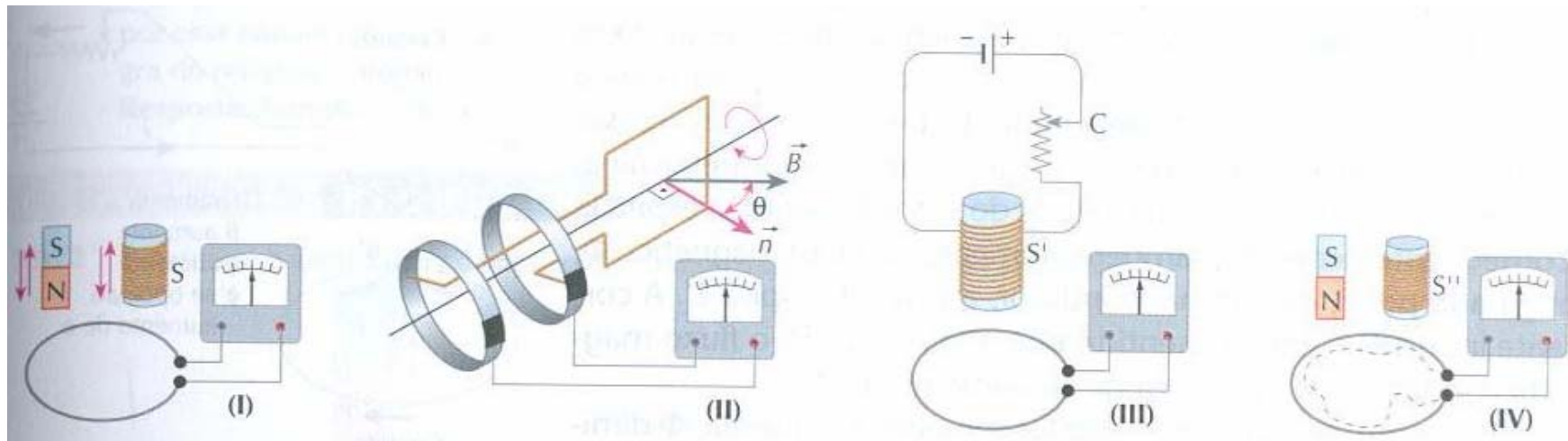
A – área da superfície atravessada pelas linhas de indução, em [m²]



Indução eletromagnética

Toda vez que o fluxo magnético através de um circuito varia, surge, neste circuito, uma fem induzida.

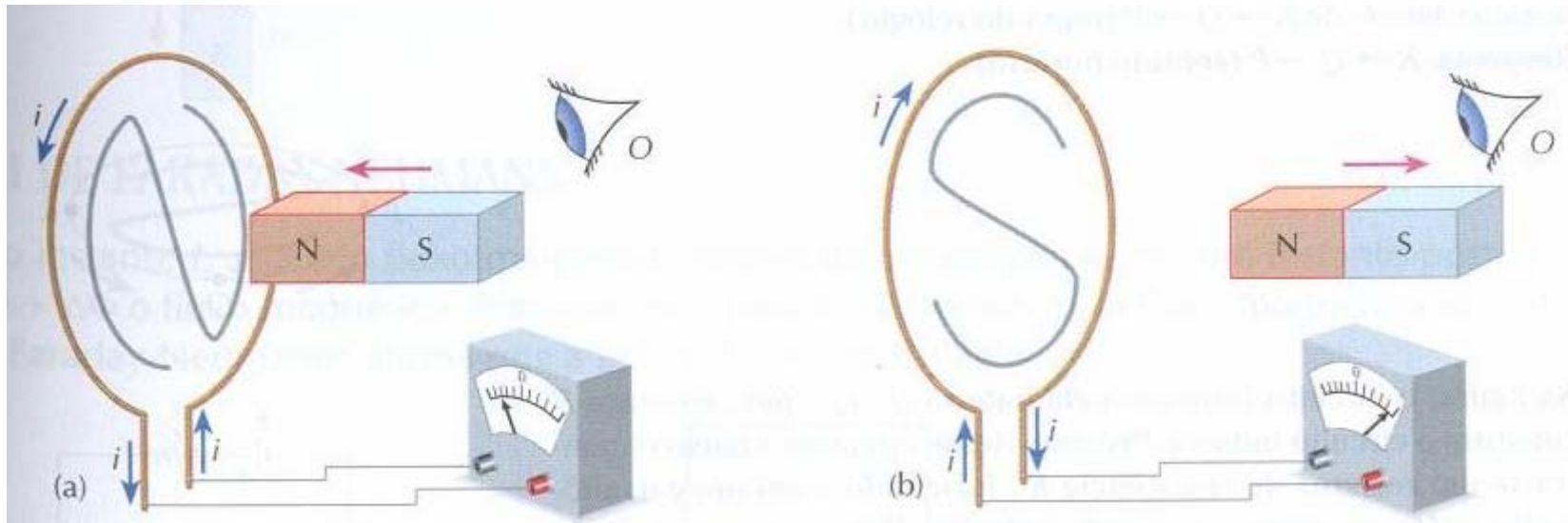
Fem – força eletromotriz.



- I – variação de B ;
- II – variação de Φ ;
- III – variação de B ;
- IV – variação de A .

Lei de Lenz

O sentido da corrente induzida é tal que, por seus efeitos, opõe-se à causa que lhe deu origem.



Sentido da corrente induzida

Lei de Faraday-Neumann

A fem induzida média em um circuito é igual ao quociente da variação do fluxo magnético pelo intervalo de tempo em que ocorre, com sinal trocado.

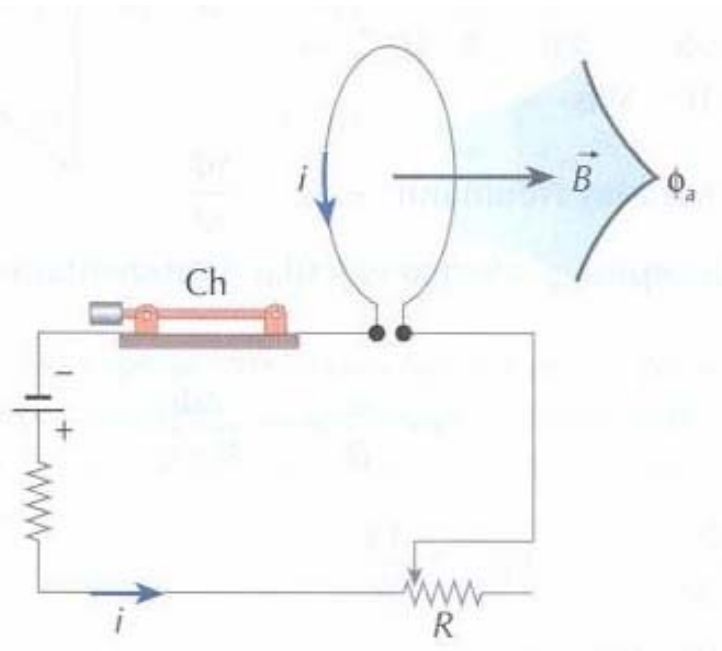
$$e_m = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

e_m – é a fem induzida, [V]

$\Delta\Phi$ – variação no fluxo magnético, [Wb]

Δt – intervalo de tempo em que ocorre a variação, [s]

Auto-Indução



$$\phi_a = L \cdot i$$

Φ_a – é o fluxo auto-induzido através da espira, [Wb]

i – corrente elétrica que percorre a espira, [A]

L – coeficiente que depende da configuração do circuito e do meio, chamado de **indutância** e medido em Henrys [H].

Auto-Indução

$$e_a = -\frac{\Delta\phi_a}{\Delta t} \quad \rightarrow \quad \Delta\phi_a = L \cdot \Delta i \quad (L \text{ é uma constante})$$

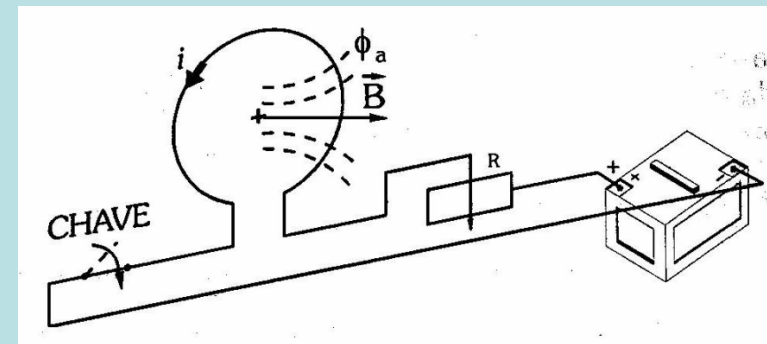
$$e_a = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

e_a – fem auto-induzida, [V]

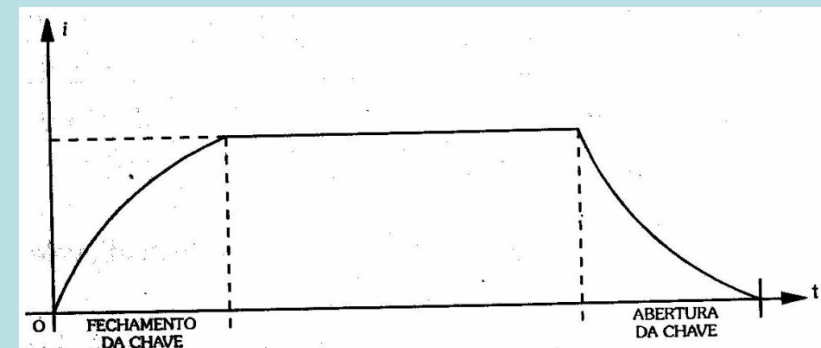
L – indutância do circuito, [H]

Δi – variação da corrente elétrica, [A]

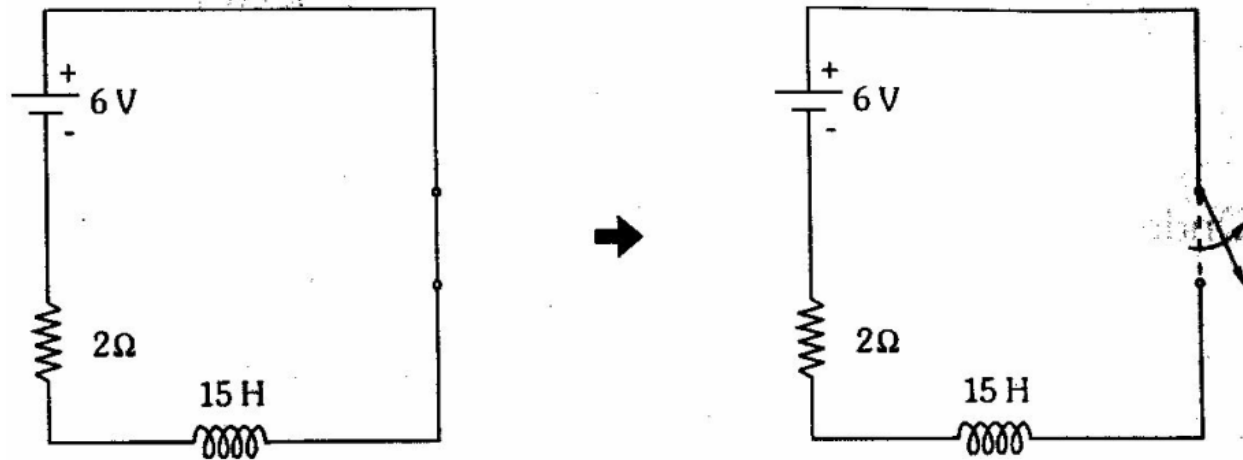
Δt – intervalo de tempo em que ocorre a variação, [s]



Circuito e corrente resultante



Transiente em um indutor



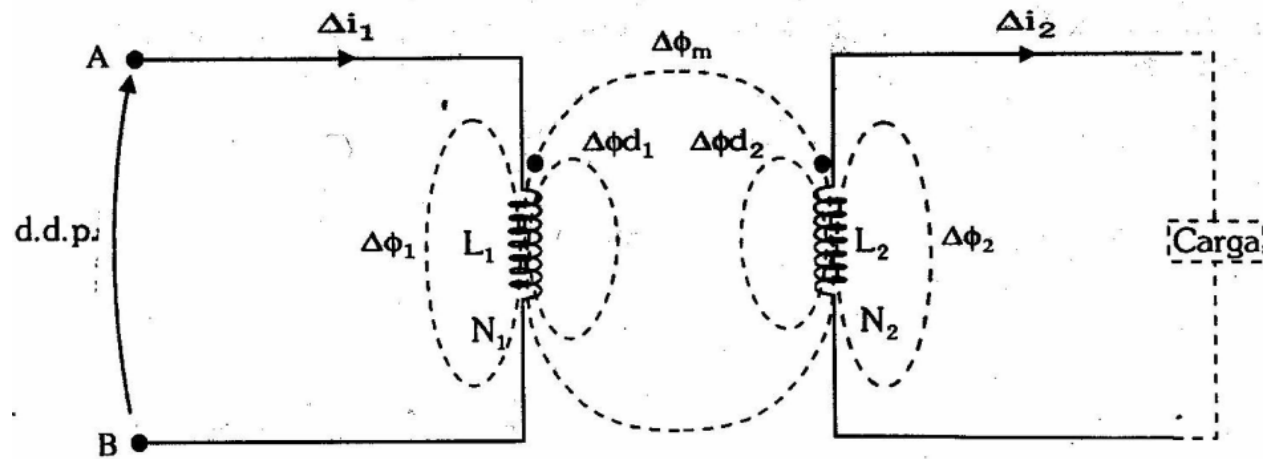
$$i = \frac{6}{2} = 3 \text{ A (em regime)} \quad L = 15 \text{ H}$$

$$\Delta t = 0,00001 \text{ s} \rightarrow i = 2,994 \text{ A} \rightarrow \Delta i = 3 - 2,994 = 0,0006 \text{ A}$$

$$e_a = -15 \frac{0,0006}{0,00001} = -900 \text{ V}$$

Associação de indutores

Indutância mútua (L_M)



$$L_M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

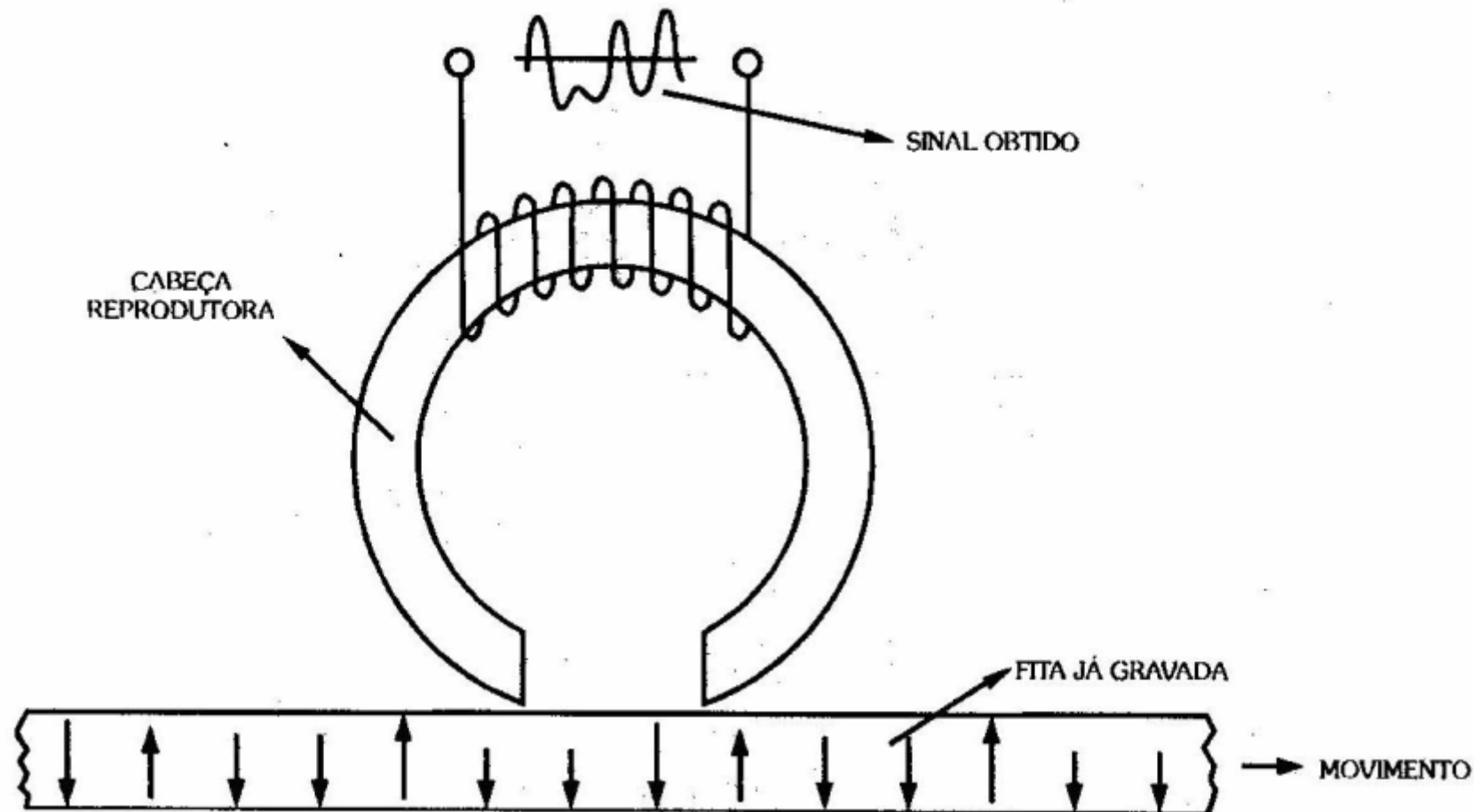
k – coeficiente de acoplamento (0 a 1)

Indutores em série e em paralelo

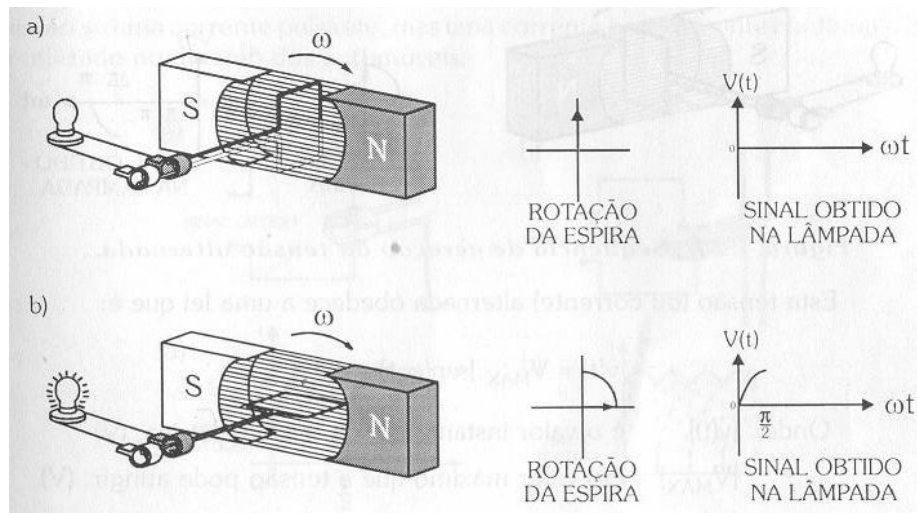
$$L_T = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

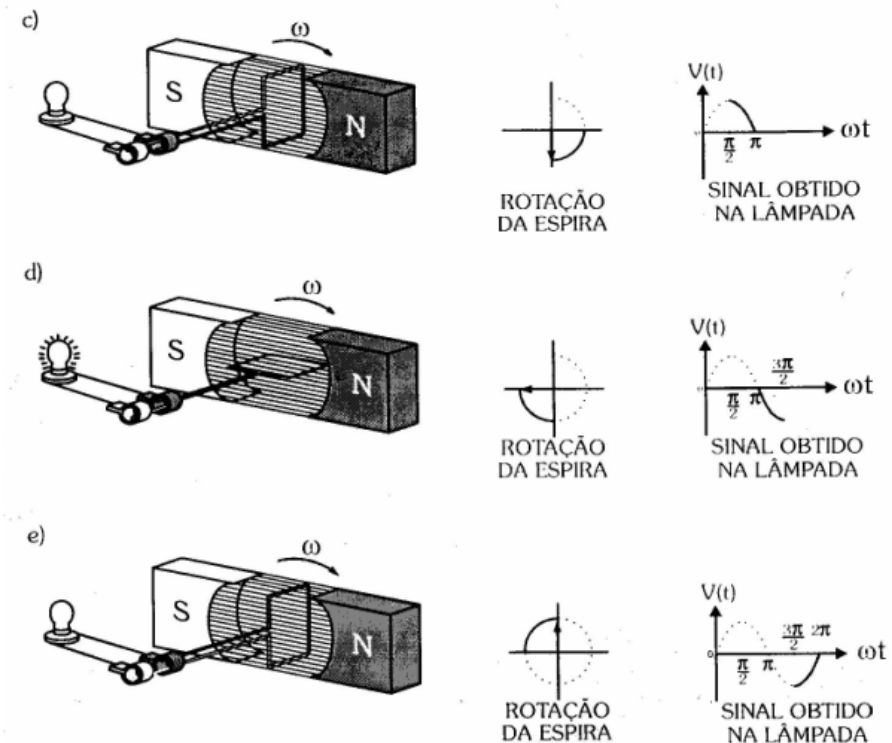
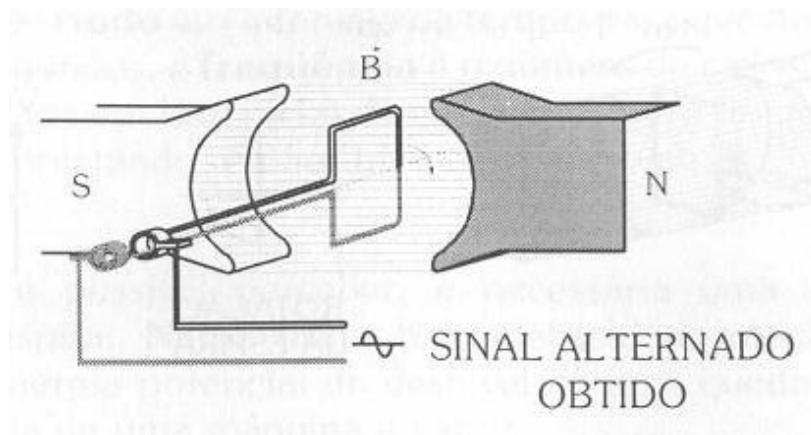
Aplicações práticas – Gravação de som



Aplicações práticas – Gerador elementar



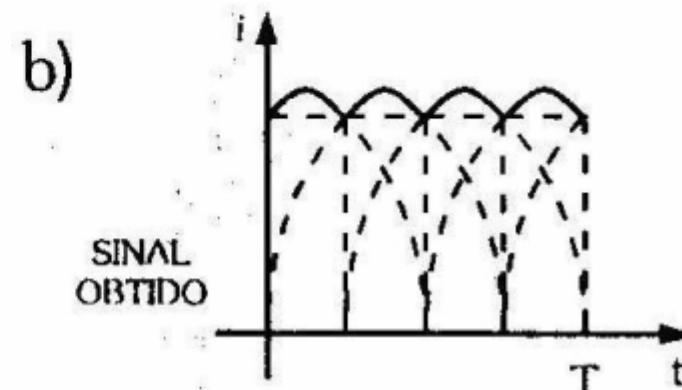
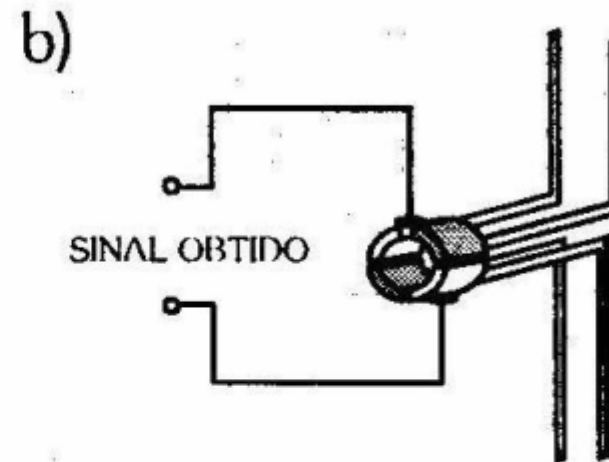
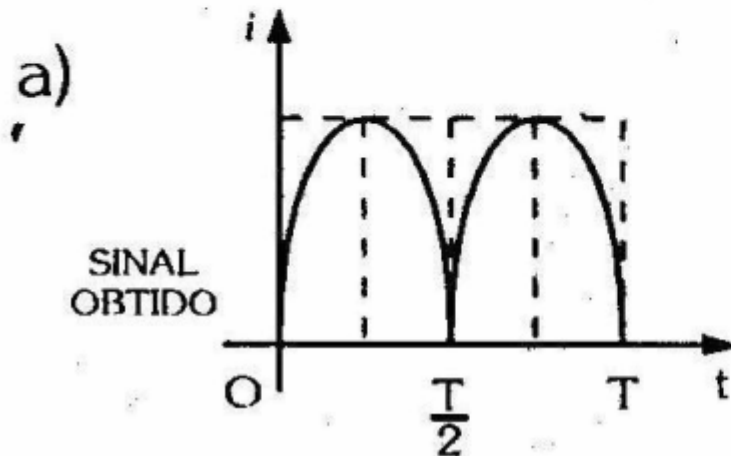
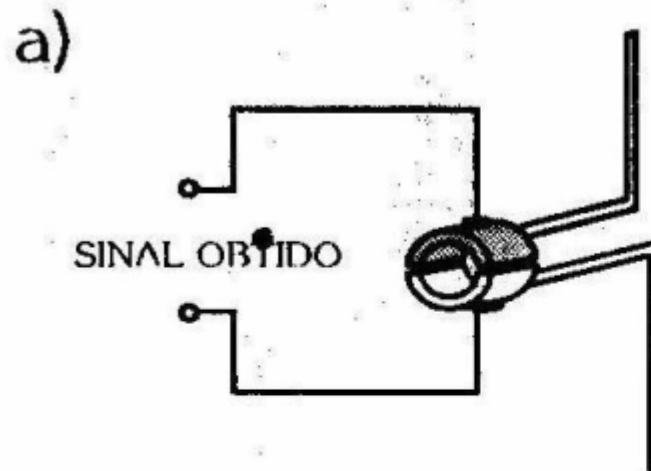
Obtenção de uma tensão senoidal



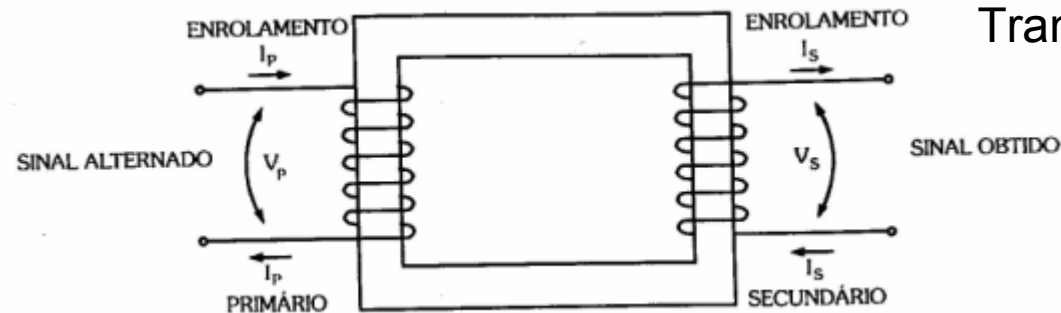
Gerador elétrico elementar

Aplicações práticas – Gerador elementar

Obtenção de uma tensão contínua



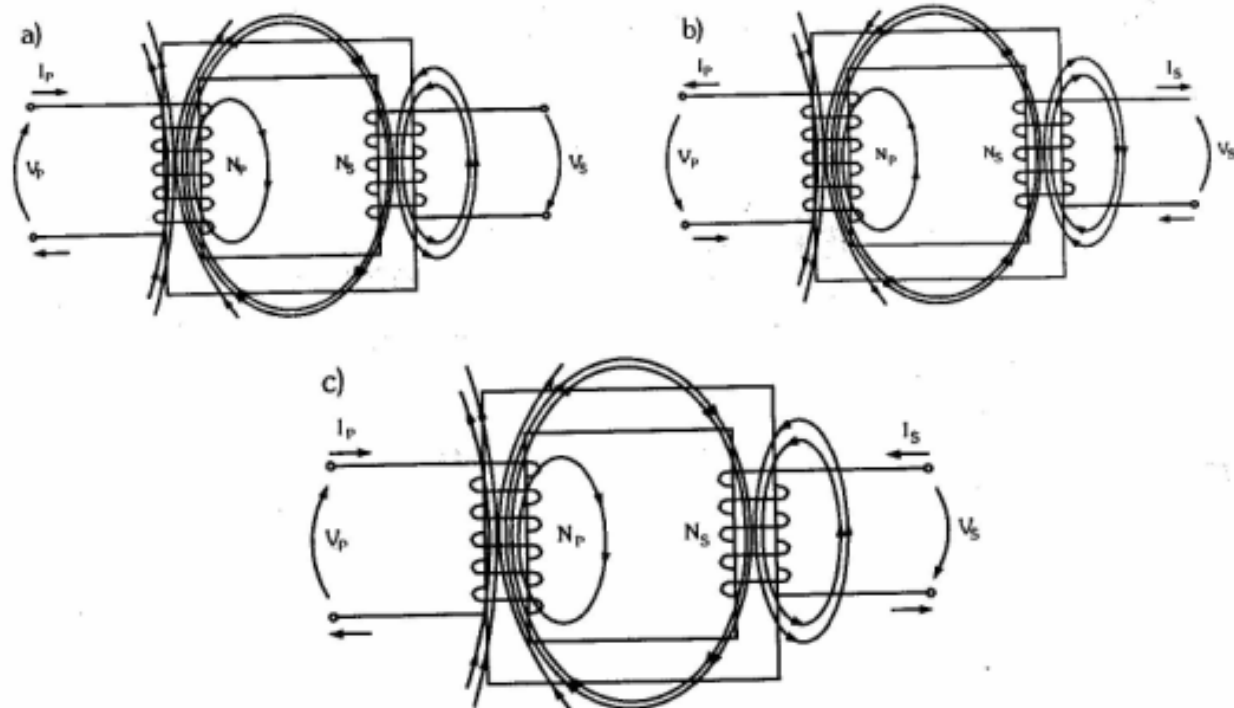
Aplicações práticas – Transformador monofásico



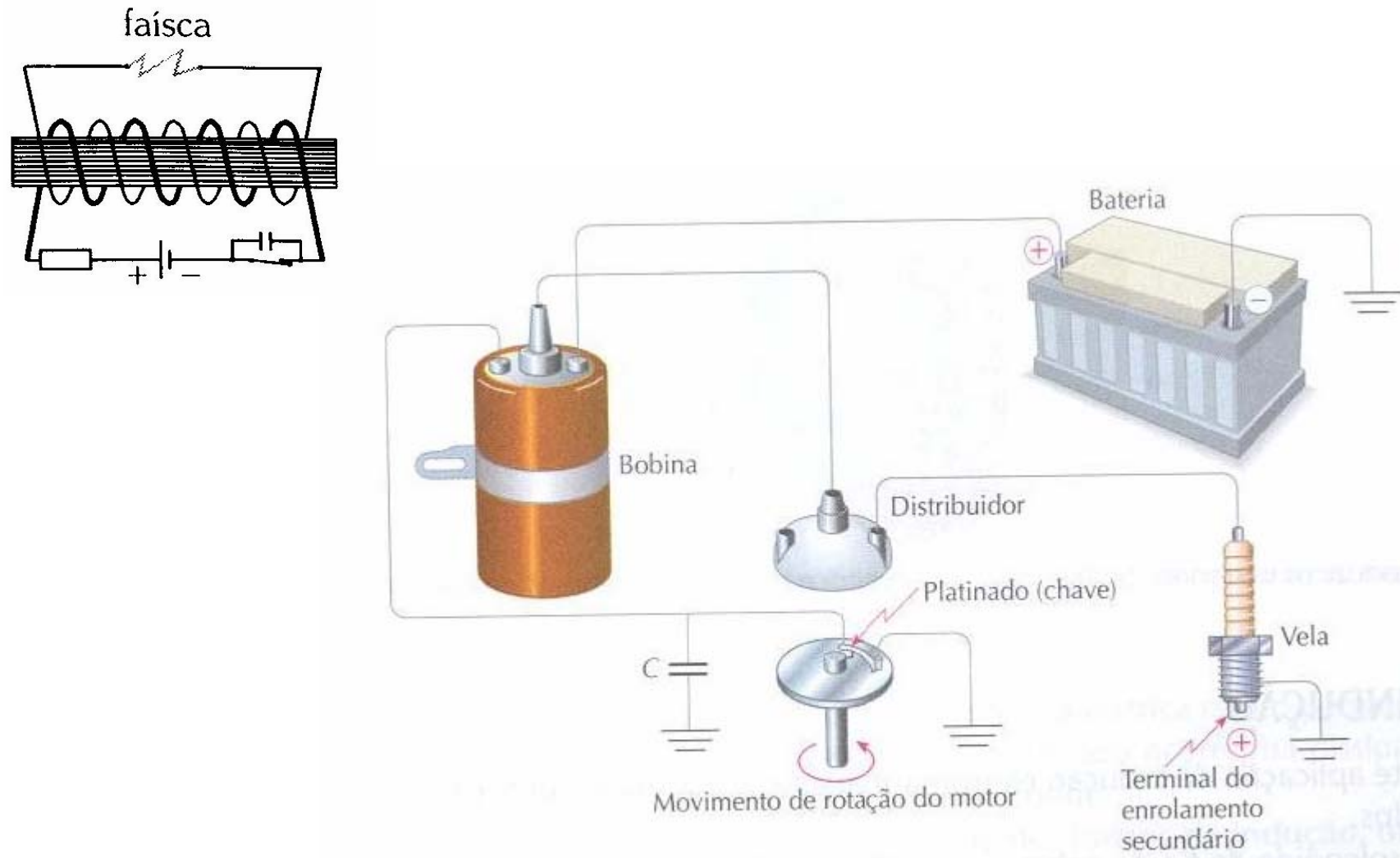
Transformador monofásico

Princípio de funcionamento

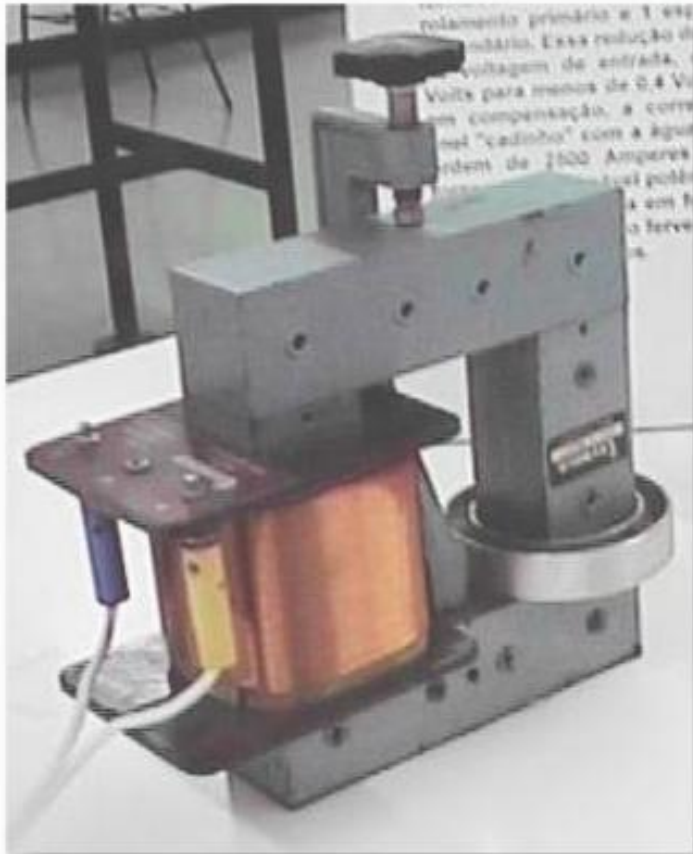
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$



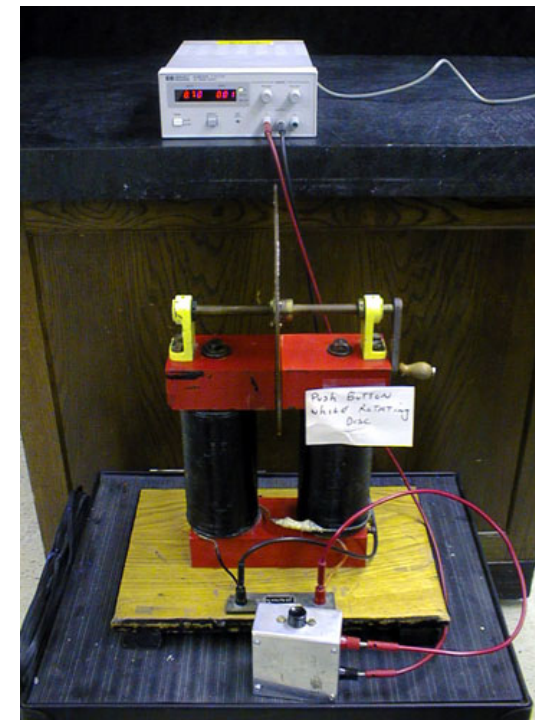
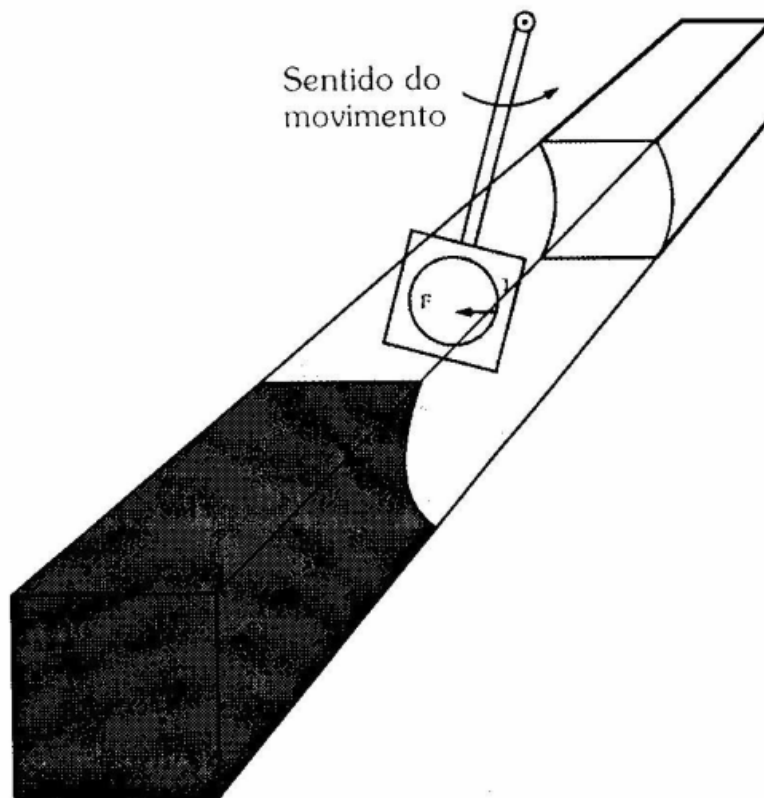
Aplicações práticas – Bobina de ignição



Aplicações práticas – Forno de indução



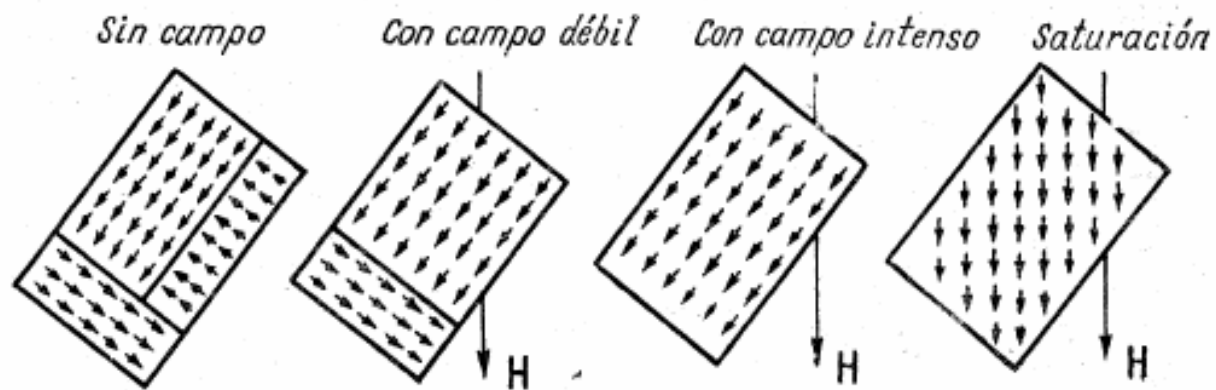
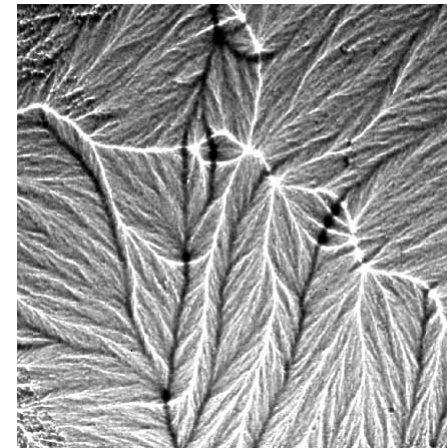
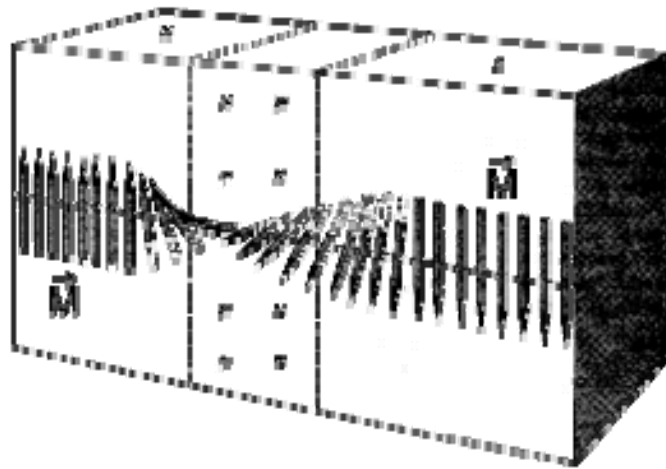
Aplicações práticas – Freios magnéticos



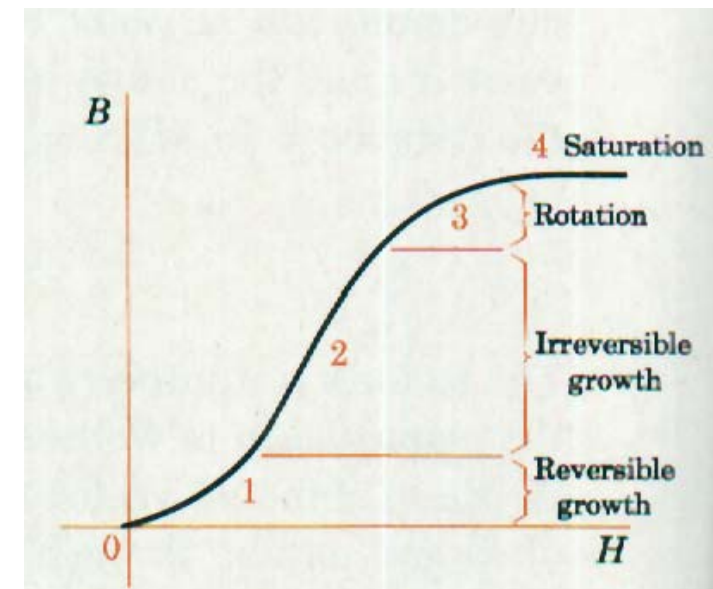
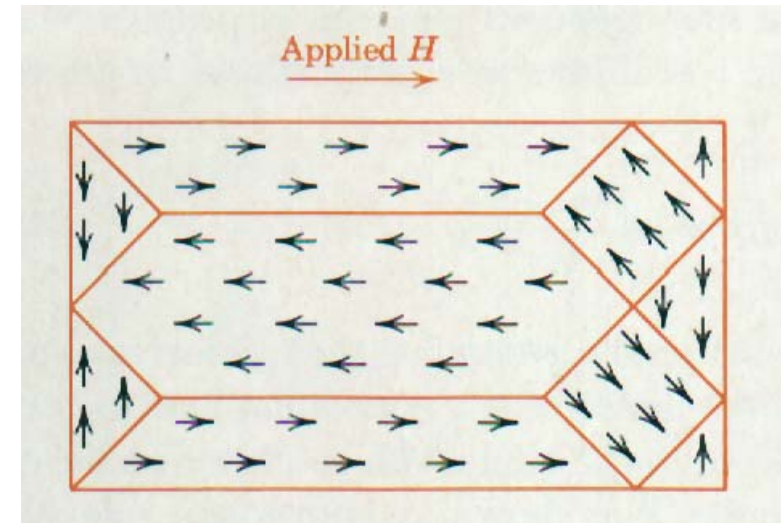
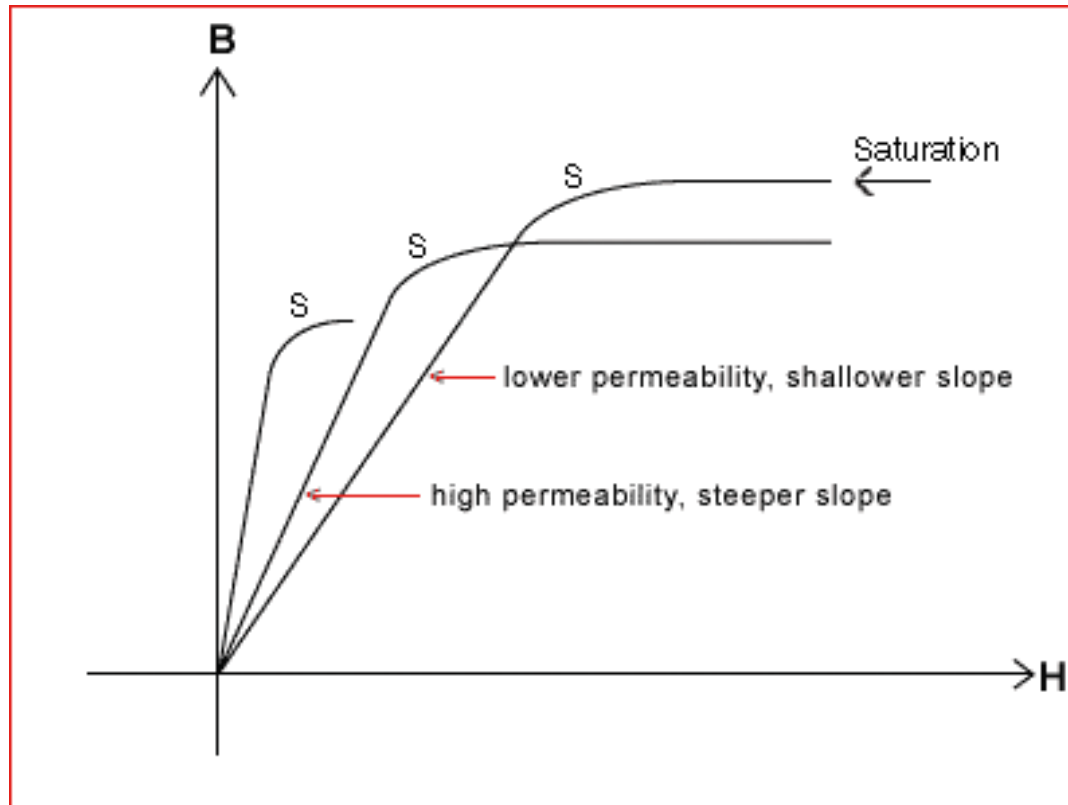
Parte 5

Materiais Magnéticos

Curva de magnetização



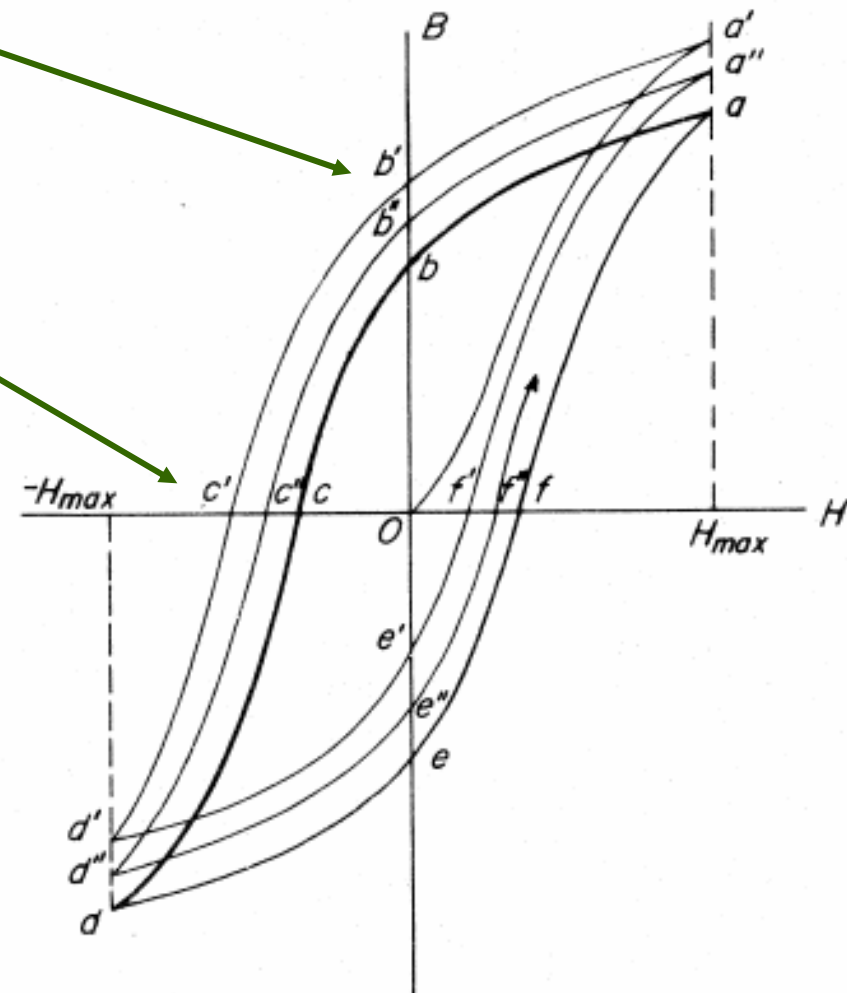
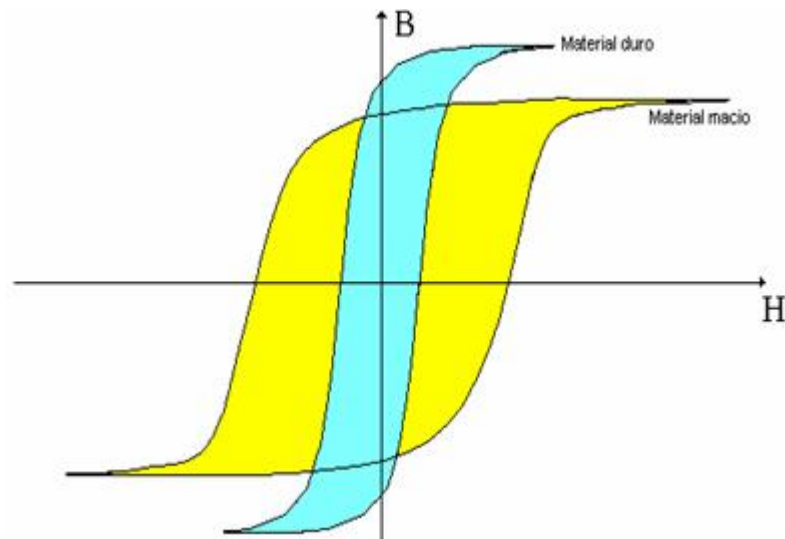
Curva de magnetização



Histerese

Magnetização remanente

Campo coercitivo



Perdas magnéticas

Correntes parasitas:

- Induzidas no núcleo, devido ao mesmo ser, normalmente, de material ferromagnético.

Perdas por histerese:

- Trabalho realizado pelo campo (H) para obter o fluxo (B);
- Expressa a dificuldade que o campo (H) terá para orientar os domínios de um material ferromagnético.

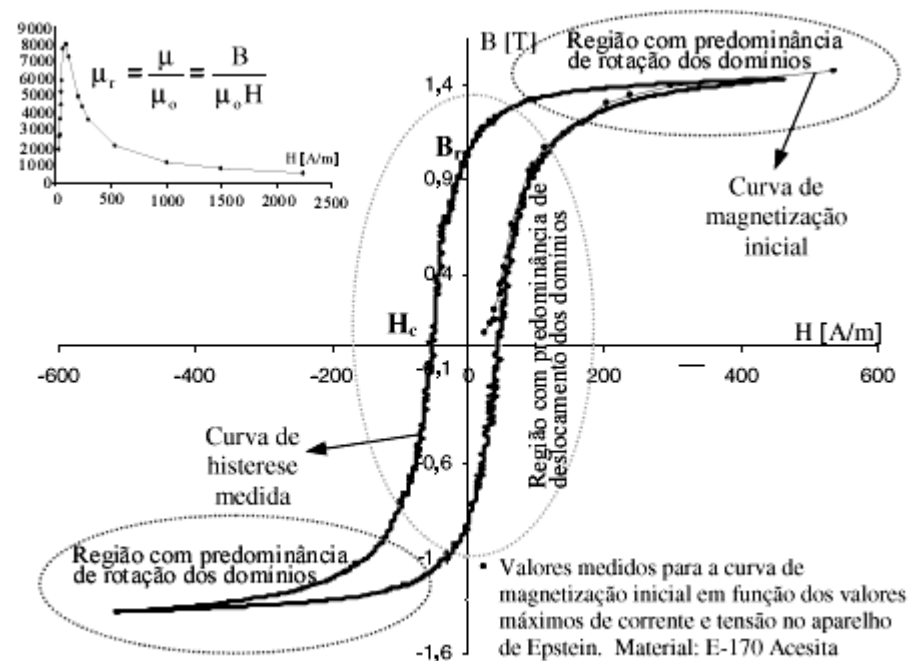


Figura 1: Curva representativa da histerese medida à 1Hz.

Classificação dos materiais

Classificação quanto ao alinhamento magnético:

- Materiais magnéticos moles – não retido;
- Materiais magnéticos duros – permanentemente retido.

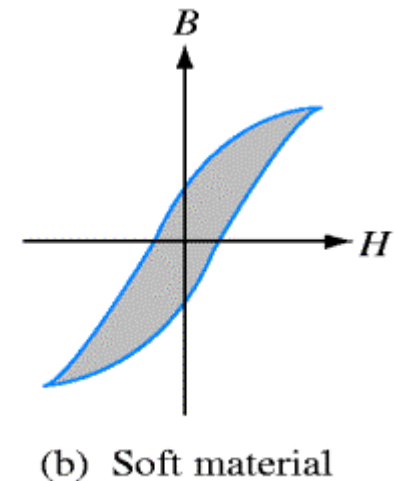
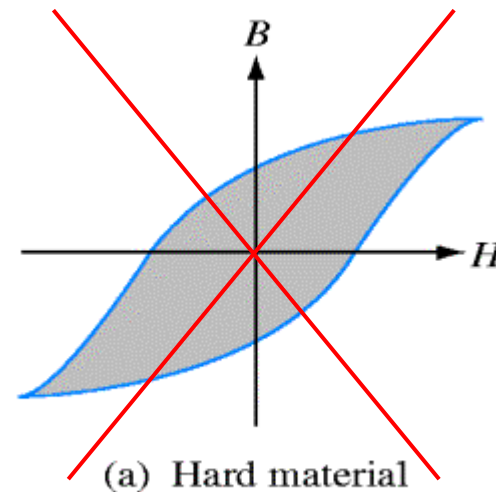
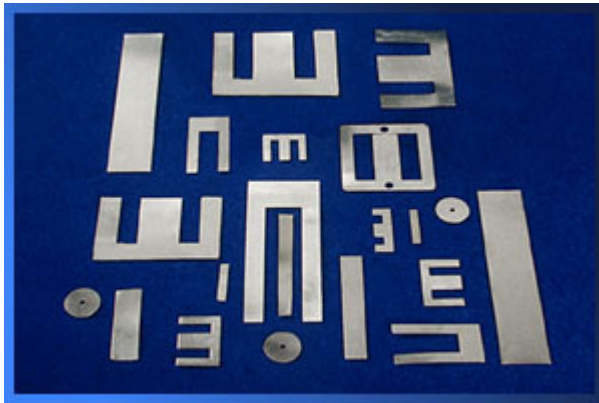
Classificação quanto a susceptibilidade e permeabilidade:

- Diamagnéticos;
- Paramagnéticos;
- Ferromagnéticos;
- Ferrimagnéticos;
- Antiferromagnéticos.

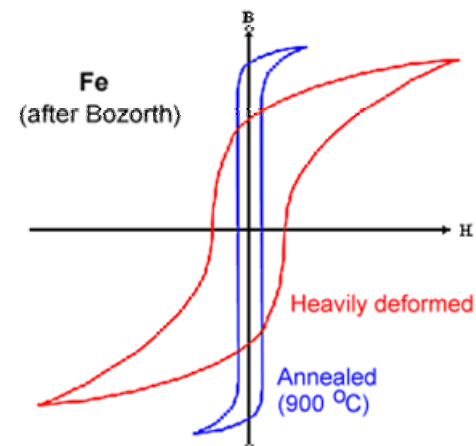
Materiais magnéticos moles

Característica geral:

- Não apresentam magnetismo remanente.



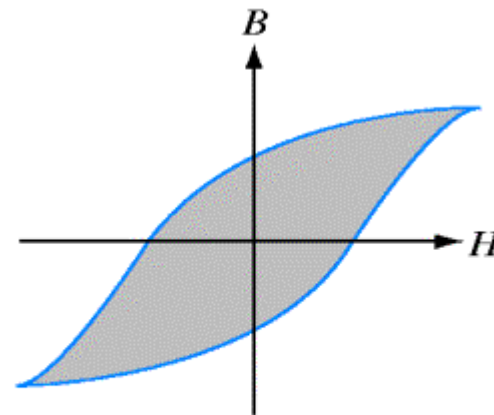
Recozimento →



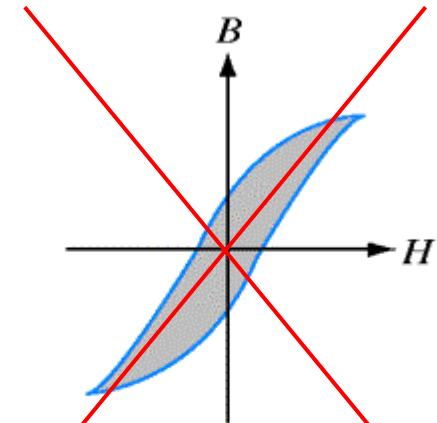
Materiais magnéticos duros

Característica geral:

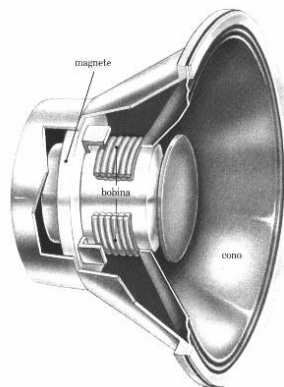
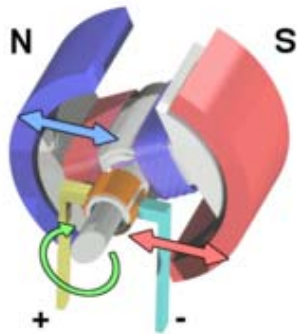
- Apresentam elevado magnetismo remanente.



(a) Hard material



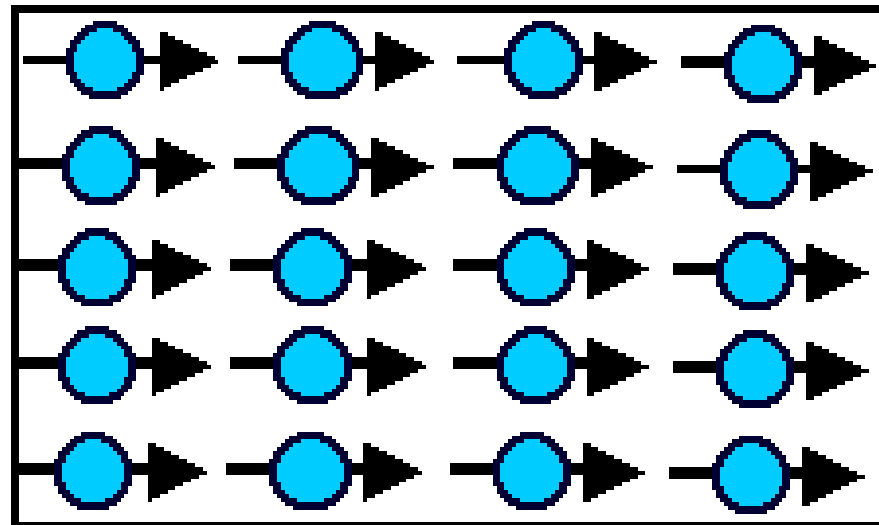
(b) Soft material



Materiais diamagnéticos

Características:

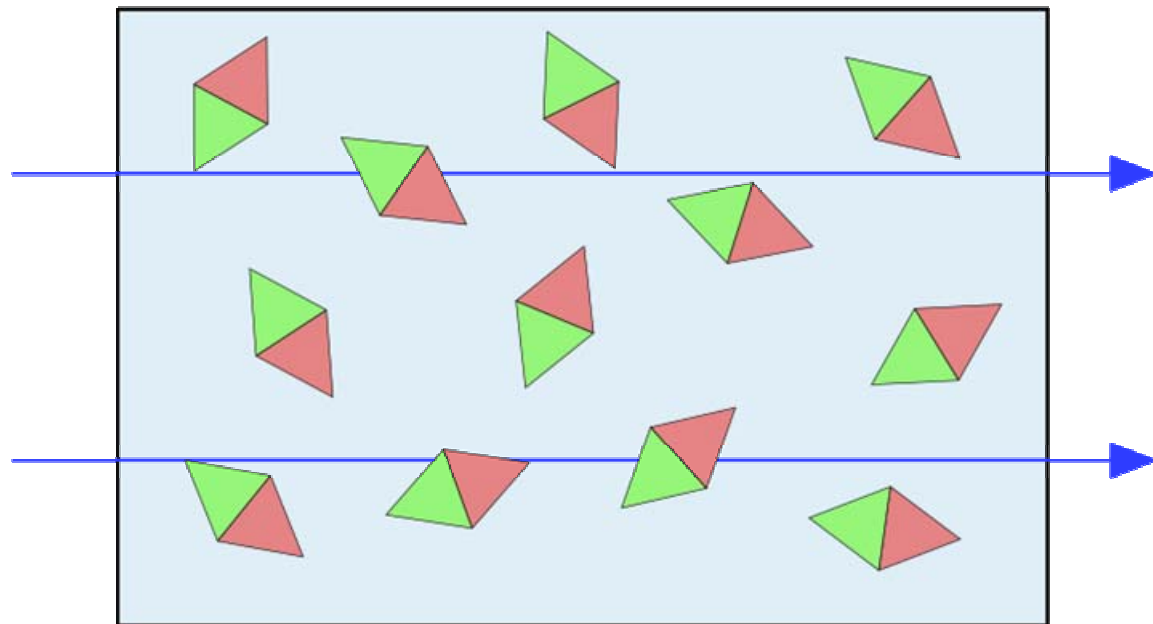
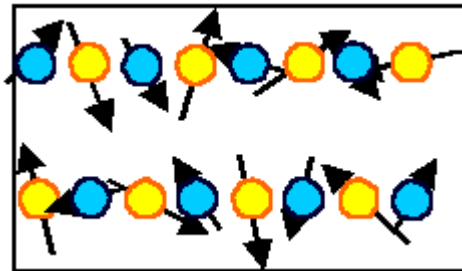
- Permeabilidade abaixo de 1, $\mu < 1$;
- Exemplos: gases inertes, metais (cobre, bismuto, ouro, etc.).



Materiais paramagnéticos

Características:

- Permeabilidade acima de 1, $\mu > 1$;
- Exemplos: alumínio, platina, sais de: ferro, cobalto, níquel, etc.



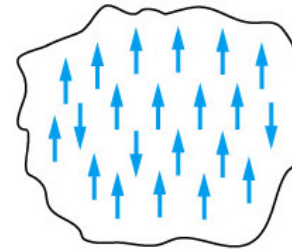
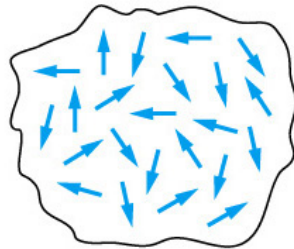
Materiais ferromagnéticos

Características:

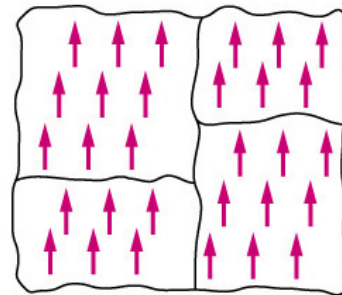
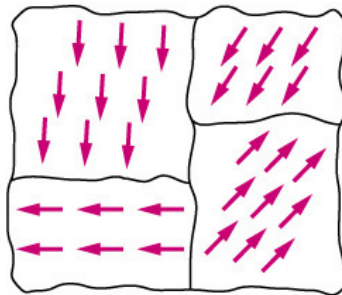
- Permeabilidade muito maior que 1, $\mu \gg 1$;
- Exemplos: ferro, níquel, cobalto, cromo, etc.

Magnetic field absent

In presence of magnetic field

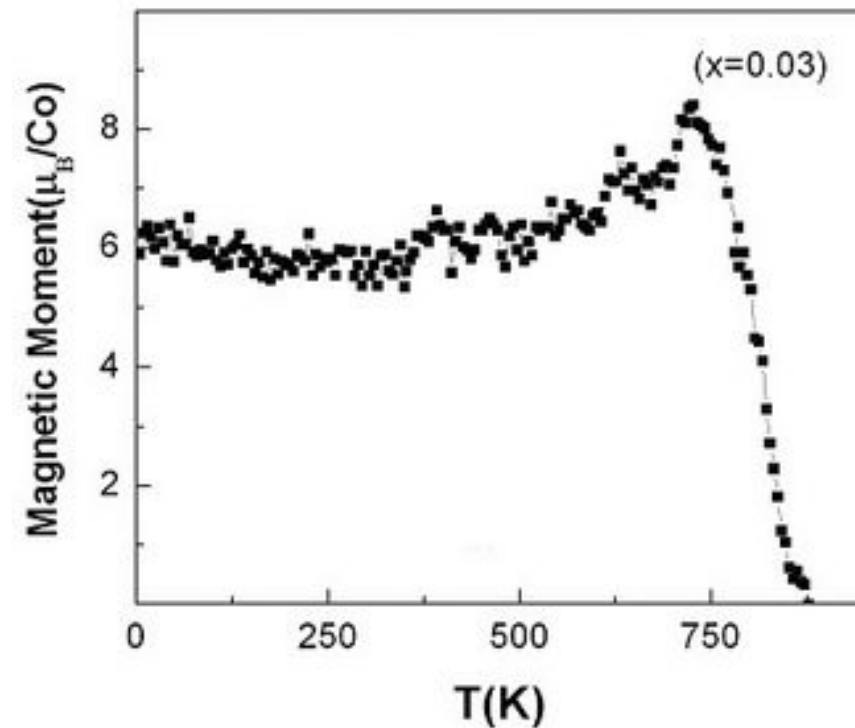
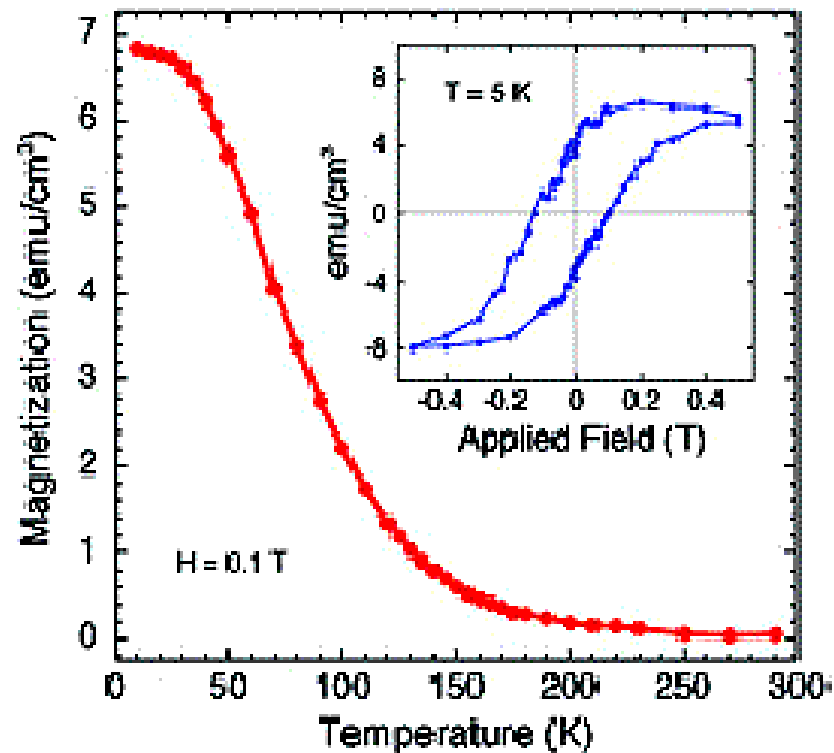


Paramagnetism

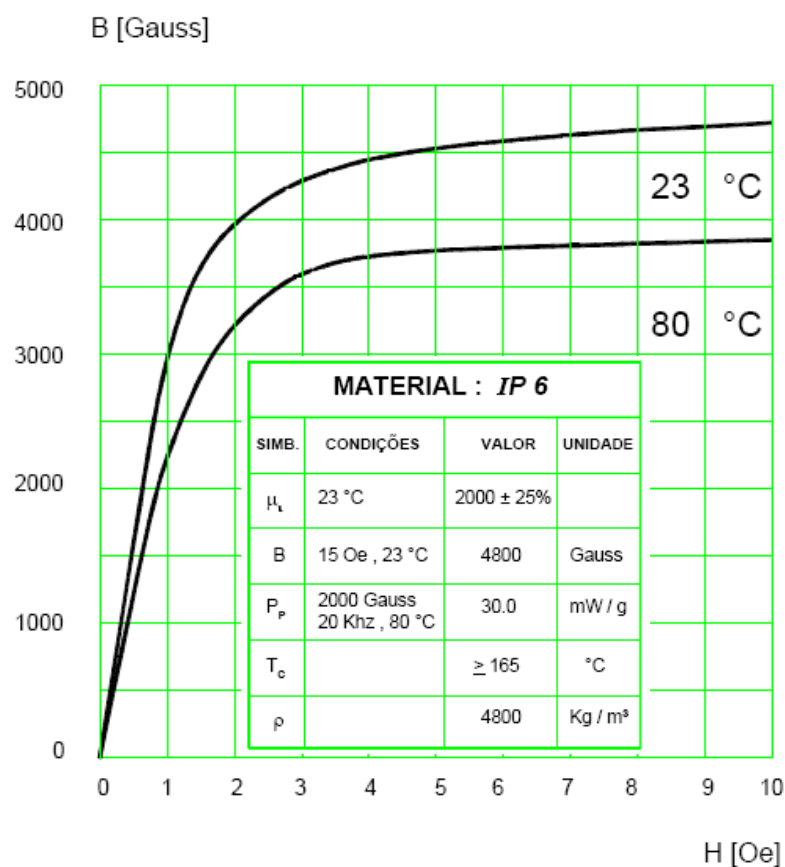
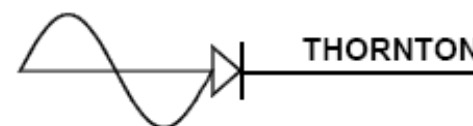


Ferromagnetism

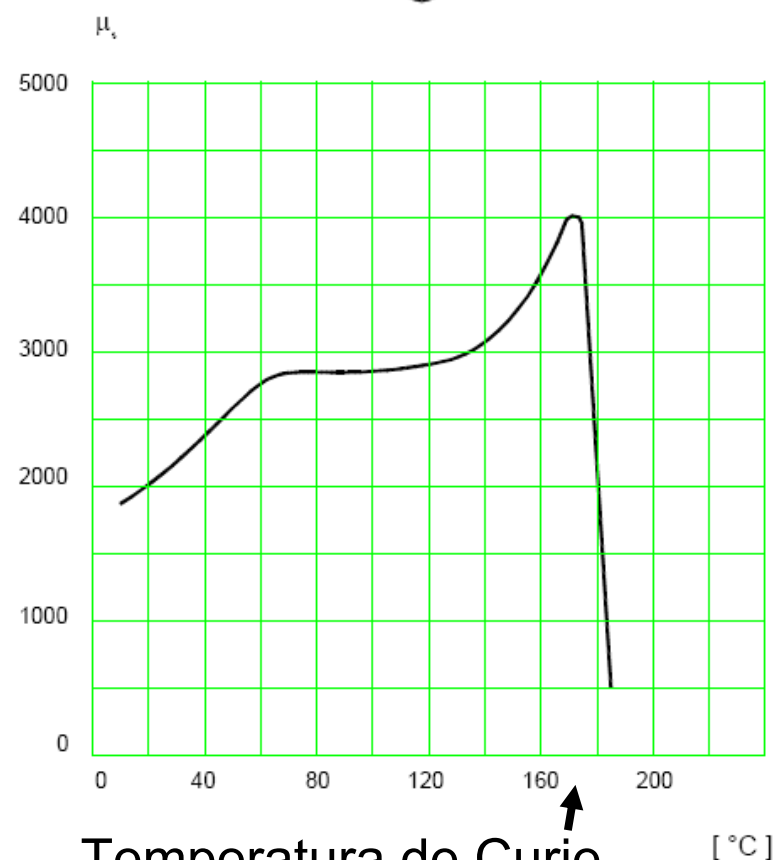
Fluxo magnético versus temperatura



Fluxo magnético versus permeabilidade



Típico B x H



μ_i x Temperatura

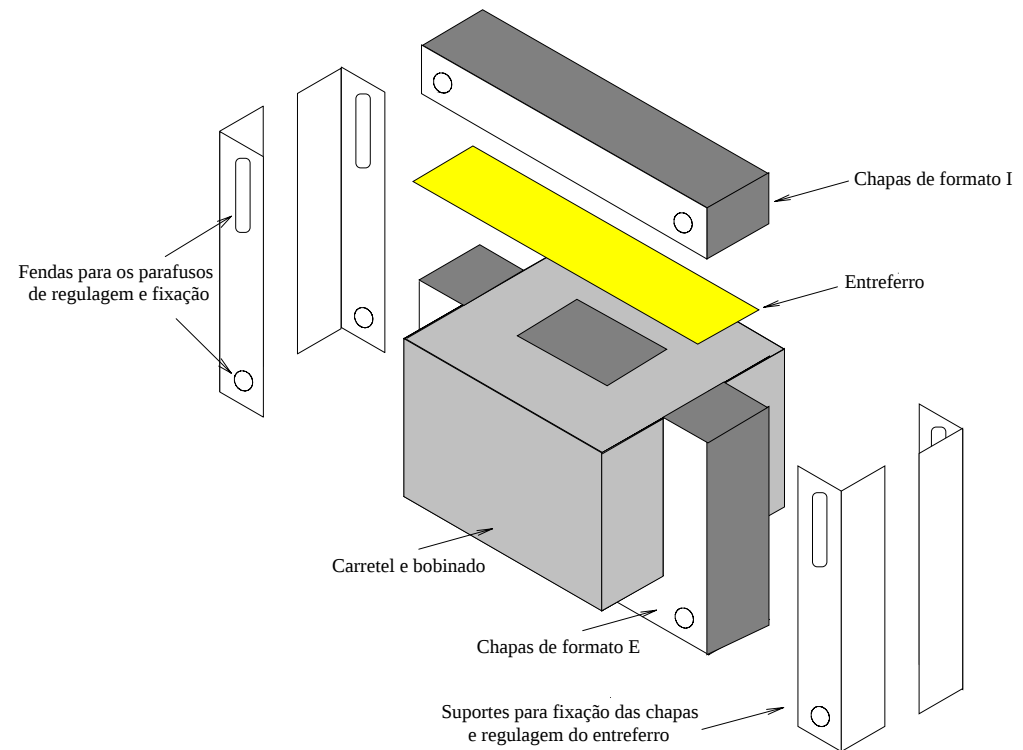
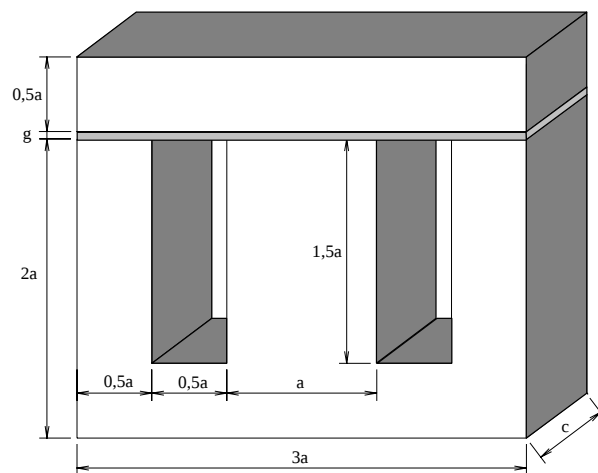
Núcleos magnéticos

Núcleos:

- Laminados
 - Ferro – silício de grão não orientado;
 - Ferro – silício de grão orientado.
- Compactados
 - Ferrites;
 - Pós metálicos.



Núcleos magnéticos laminados

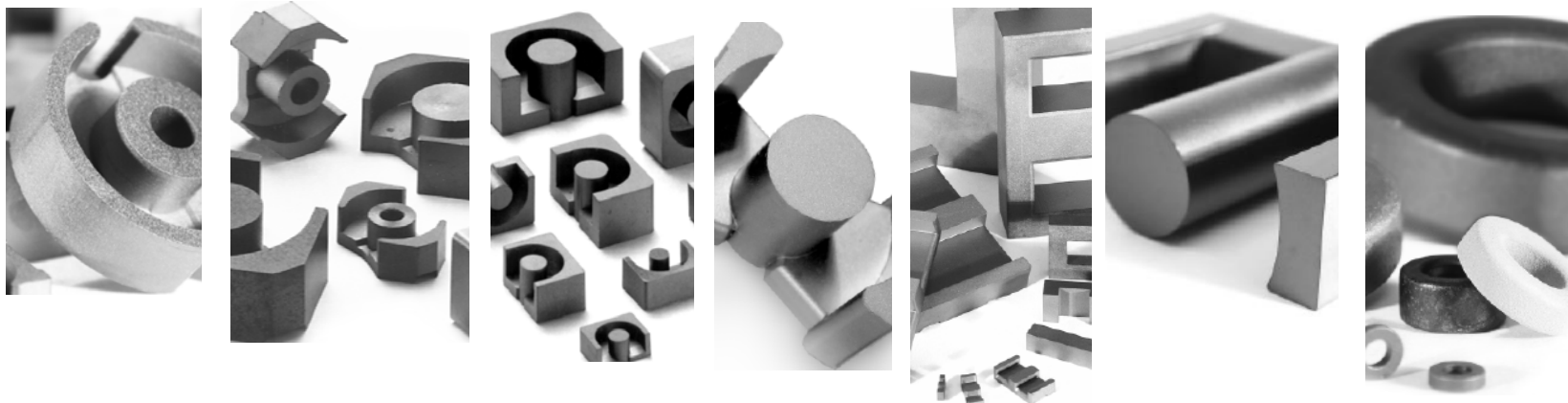


Núcleos magnéticos compactos



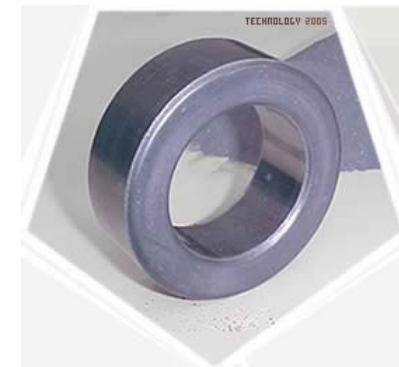
TABLE 1: FERRITE CORE COMPARATIVE GEOMETRY CONSIDERATIONS

	POT CORES	DOUBLE SLAB, RM CORES	EP CORES	PQ CORES	E CORES	EC, ETD, EER, ER CORES	TOROIDS
See Catalog Section	6	7-8	9	10	11	12	13
Core Cost	High	High	Medium	High	Low	Medium	Very Low
Bobbin Cost	Low	Low	High	High	Low	Medium	None
Winding Cost	Low	Low	Low	Low	Low	Low	High
Winding Flexibility	Good	Good	Good	Good	Excellent	Excellent	Fair
Assembly	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Medium	None
Mounting Flexibility**	Good	Good	Good	Fair	Good	Fair	Poor
Heat Dissipation	Poor	Good	Poor	Good	Excellent	Good	Good
Shielding	Excellent	Good	Excellent	Fair	Poor	Poor	Good



<http://www.mag-inc.com>

Núcleos magnéticos compactos



Núcleos magnéticos planares



Núcleos planares

