

PEN 5004

Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

Prof. Alexandre Piantini – piantini@jee.usp.br

Objetivo

Familiarização com os fenômenos e conceitos básicos associados à Eletricidade, ao Magnetismo e aos circuitos e sistemas elétricos.

PROGRAMA

PEN 5019

- **Carga Elétrica, Lei de Coulomb**
- **Campo e Potencial Elétrico**
- **Capacitores e Dielétricos**
- **Corrente e Resistência Elétrica, Lei de Ohm**
- **Força Eletromotriz e Circuitos Elétricos**
- **Campo Magnético**

Bibliografia:

- D. Halliday, R. Resnick, "Física" (vol. 3), LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

- W. H. Hayt Jr., "Eletromagnetismo", LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

PROGRAMA

PEN 5019

- Circuitos elétricos
- Geração hidráulica
- Transmissão de energia elétrica
- Distribuição de energia elétrica

1) CARGA ELÉTRICA

PEN 5019

Duas espécies: (+) e (-)

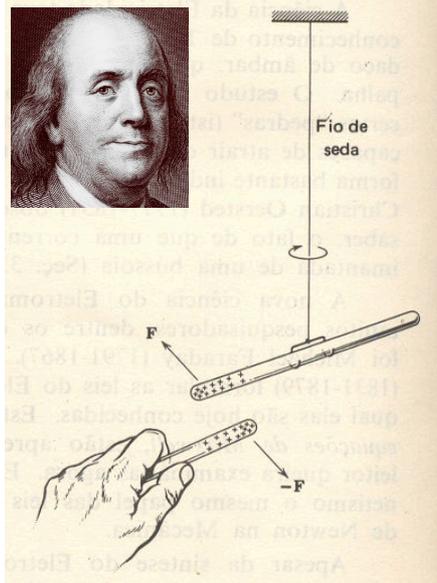
Cargas exercem forças entre si.

Benjamin Franklin (1706 – 1790)

- Cargas iguais se repelem
- Cargas diferentes se atraem

Quer. subst. atritada c/ outra, sob conds. adequadas, adquirirá certa qtidade. carga (+ ou -)

Em estado normal: matéria é neutra
Atrito: destrói neutralidade inicial



CONDUTORES E ISOLANTES

PEN 5019

Metais: elétrons + afastados do núcleo (elétrons livres) não mais permanecem ligados a cada átomo; podem mover-se através de todo o material

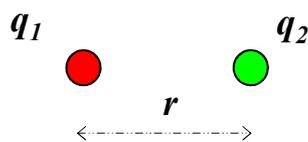
Condutores: cargas podem mover-se livremente através do material (metais, terra, ...)

Isolantes (dielétricos): cargas não podem se mover através do material (vidro, borracha, madeira, ...)

Semicondutores: categoria intermediária sob o ponto de vista de condução de eletricidade (Ge, Si)

LEI DE COULOMB (1785)

PEN 5019



$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

ϵ_0 : cte. de permissividade $\approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$

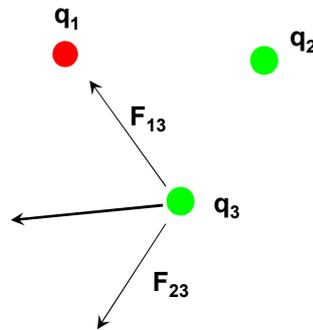
Validade: corpos carregados, dimensões $\ll r$ (cargas puntiformes)

VÁRIAS CARGAS PRESENTES

PEN 5019

$$F_{13} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_3}{r_{13}^2}$$

$$F_{23} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_2 \cdot q_3}{r_{23}^2}$$



CARGA FUNDAMENTAL

PEN 5019

Época de Franklin (1706-1790): carga → fluido contínuo

Teoria atômica da matéria → fluidos não são contínuos (átomos)

O “fluido elétrico” é constituído de um múltiplo inteiro de uma certa quant. mínima de carga.

Carga fundamental: $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Qualquer quant. carga Q existente na Natureza (independente/ da sua origem) pode ser escrita como

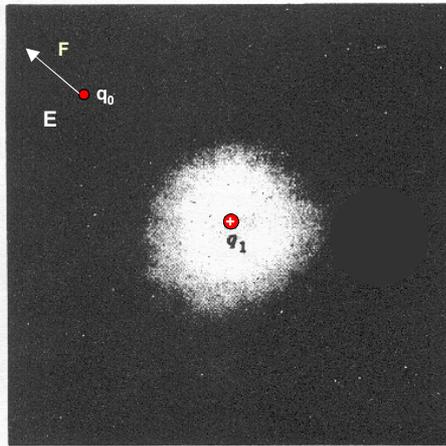
$$Q = n \cdot e \quad (n = n^\circ \text{ inteiro, (+) ou (-)})$$

Carga: varia em “porções” discretas (não continuamente)

⇒ é quantizada!

2) CAMPO ELÉTRICO (E)

PEN 5019



1) q_1 produz E

2) E atua sobre q_2 (através de F)

Carga \rightarrow campo \rightarrow carga

(q_2 também produz um campo que atua sobre q_1)

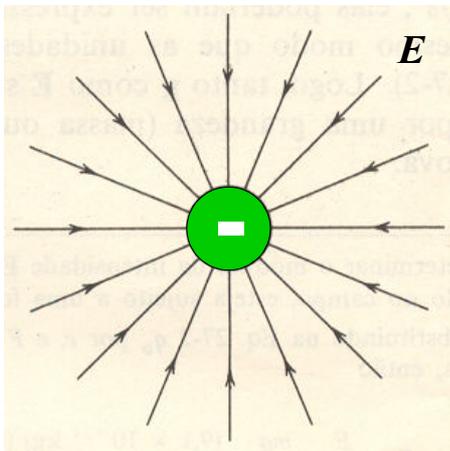
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Obs.: q_0 (+), pequena p/ não perturbar a distrib. de cargas que produzem E

CÁLCULO DE \underline{E}

PEN 5019

Carga q



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2}$$

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$$

E:

- **direção:** radial em relação a q
- **sentido:** depende de q (se + ou -)

VÁRIAS CARGAS PUNTIFORMES

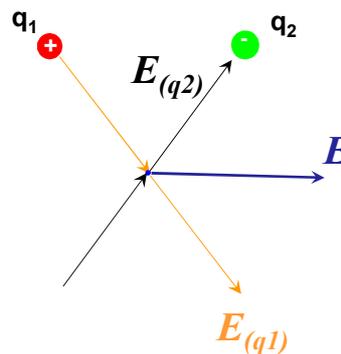
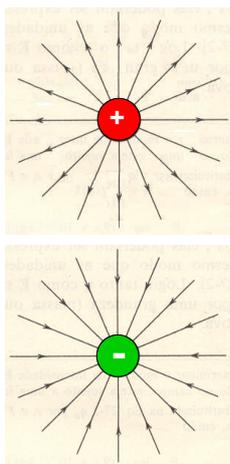
PEN 5019

Princípio da Superposição:

- 1) Calcula-se E_i produzido por cada carga como se apenas ela existisse;
- 2) soma-se vetorialmente os campos produzidos por cada carga (calculados separada/) p/ se obter $E_{\text{resultante}}$ no ponto.

CÁLCULO DE \underline{E}

PEN 5019



$$\underline{E} = \underline{E}_{(q1)} + \underline{E}_{(q2)}$$

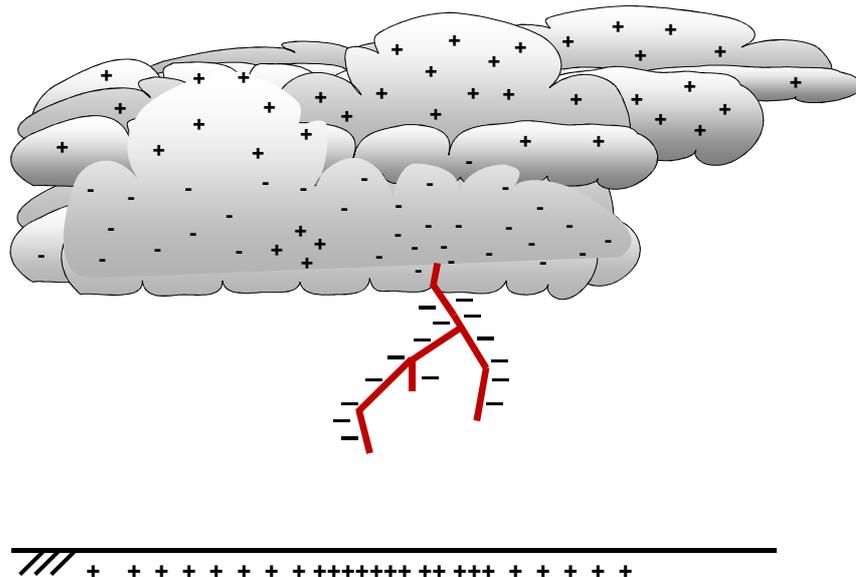
CAMPO ELÉTRICO

PEN 5019



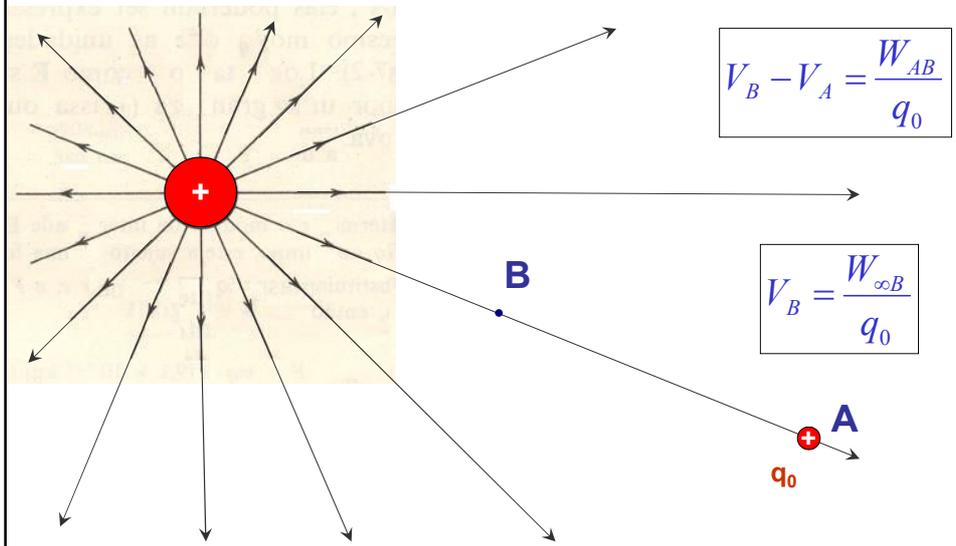
DISTRIB. CARGAS ELÉTRICAS (NUVEM CB)

PEN 5019



3) POTENCIAL ELÉTRICO (V)

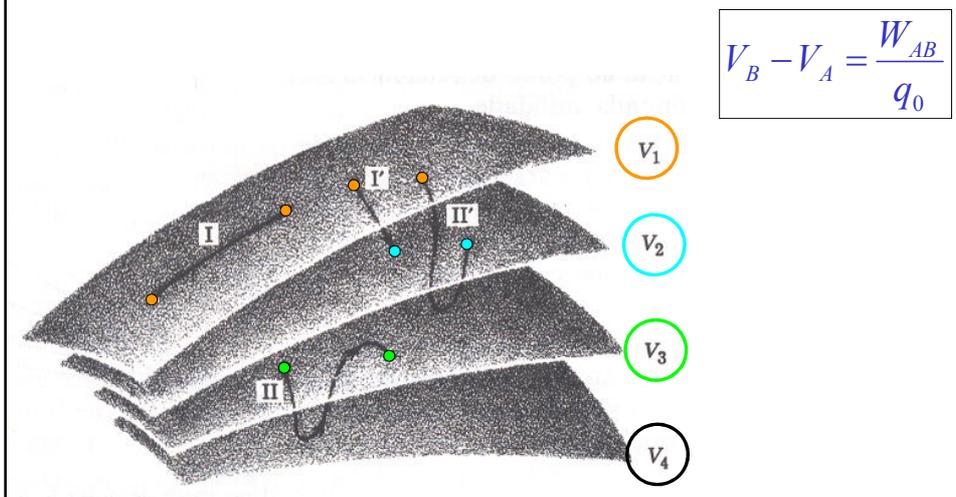
PEN 5019



SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS

PEN 5019

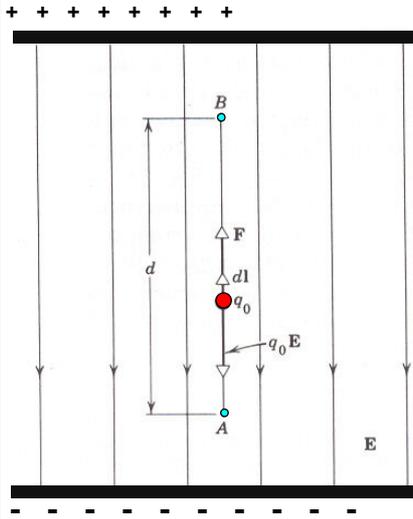
Lugar geométrico dos pontos com mesmo potencial elétrico.



CÁLCULO DE V

PEN 5019

Campo E uniforme:



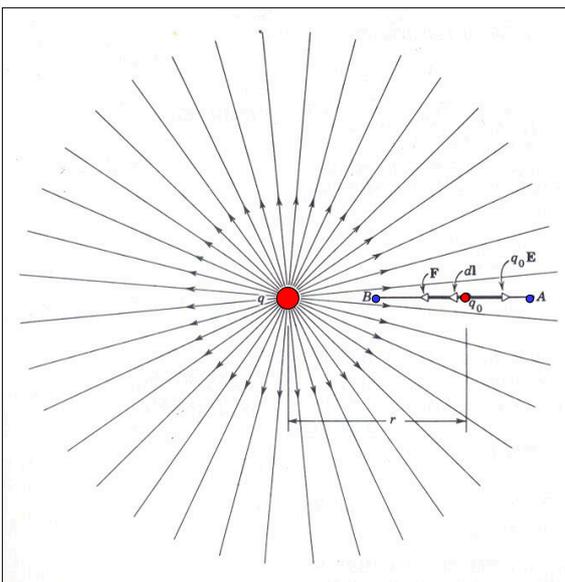
P/ mover q_0 de A até B:

$$W_{AB} = F \cdot d = (q_0 \cdot E) \cdot d$$

$$V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q_0} = E \cdot d$$

Potencial criado por uma carga puntiforme

PEN 5019



$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = -q_0 \cdot \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_{r_A}^{r_B} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Mas $E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$

$$V_B - V_A = -\frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2}$$

$$= \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

$$V = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$$

POTENCIAL ELÉTRICO

PEN 5019



POTENCIAL ELÉTRICO

PEN 5019

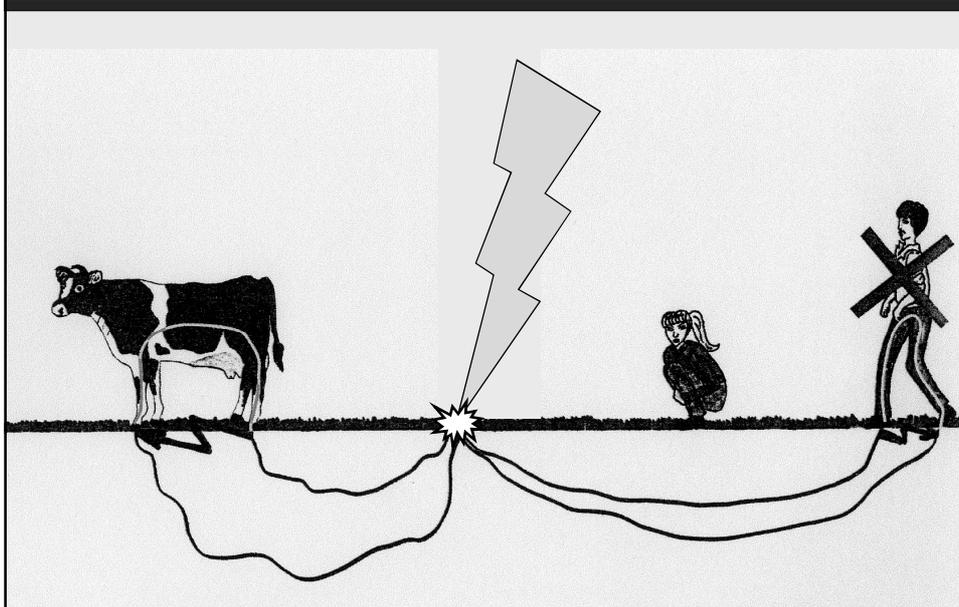
Manutenção em linha viva



<http://solucoes.grupoenergisa.com.br/paginas/nossos-servicos/manutencao-Industrial.aspx>

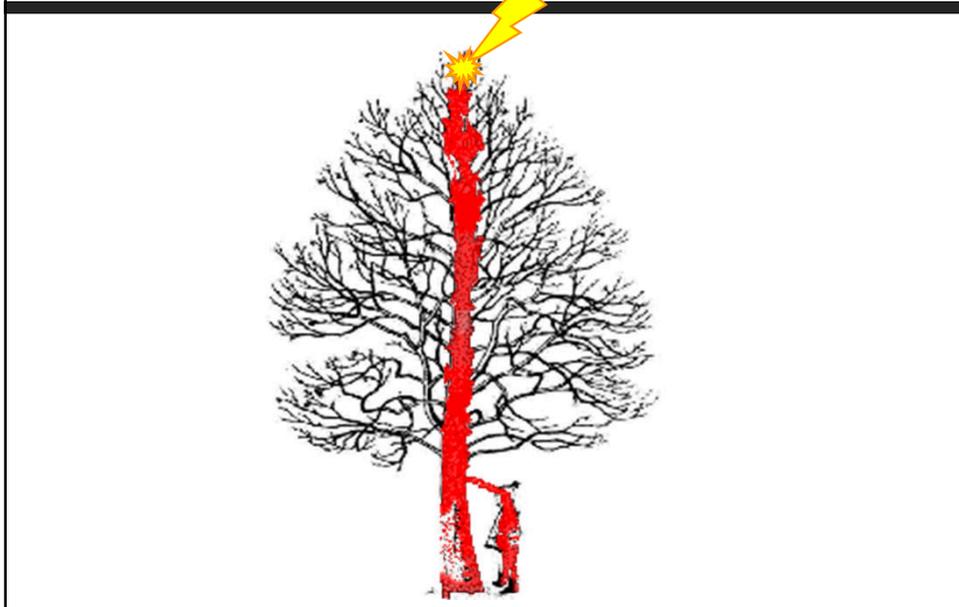
TENSÃO DE PASSO

PEN 5019



DESCARGA LATERAL

PEN 5019



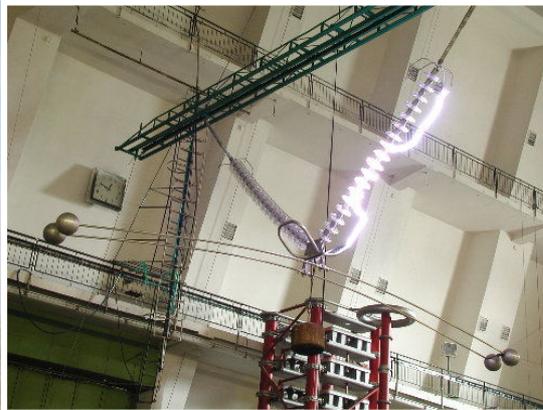
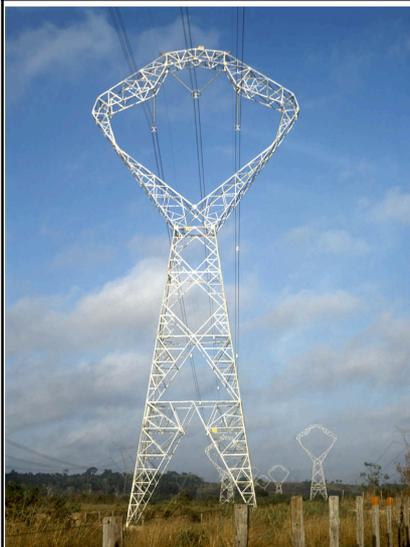
POTENCIAL ELÉTRICO

PEN 5019



POTENCIAL ELÉTRICO

PEN 5019



LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

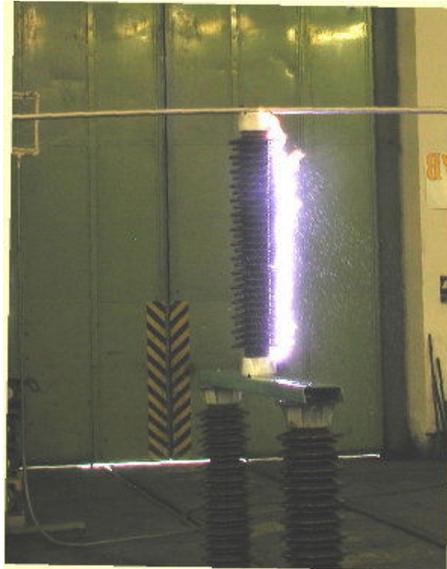
PEN 5019



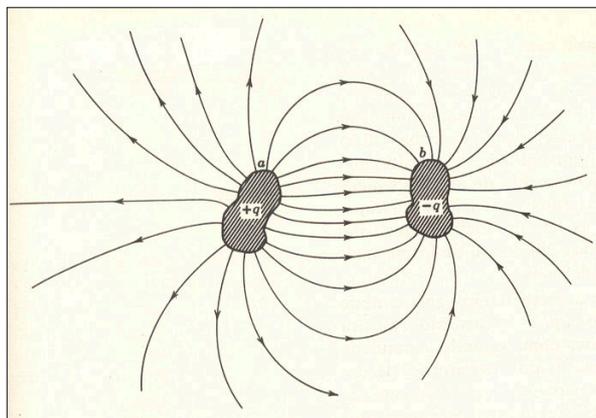
LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

PEN 5019





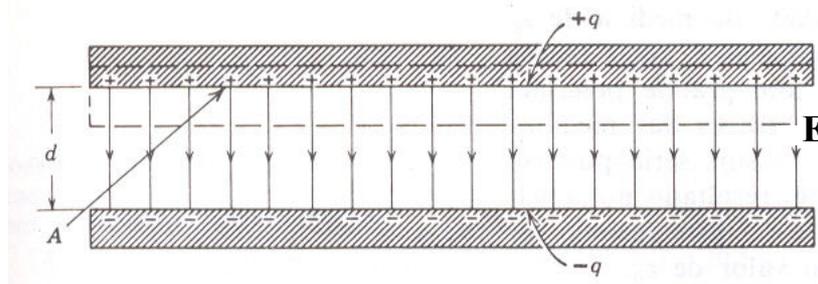
4) CAPACITORES E DIELÉTRICOS



$q = C.V$ C : capacitância (Farad)

CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS

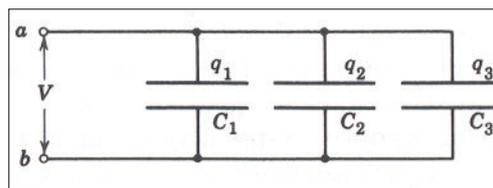
PEN 5019



$$C = \frac{q}{V} = \epsilon_0 \cdot k \cdot \frac{A}{d}$$

Capacitância Equivalente - Capacitores em Paralelo

PEN 5019



$$q_1 = C_1 \cdot V \quad q_2 = C_2 \cdot V \quad q_3 = C_3 \cdot V$$

Carga total do sistema: $q = q_1 + q_2 + q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) \cdot V$

Capacitância equivalente: $C = \frac{q}{V} = C_1 + C_2 + C_3$

Capacitância Equivalente - Capacitores em Série

PEN 5019

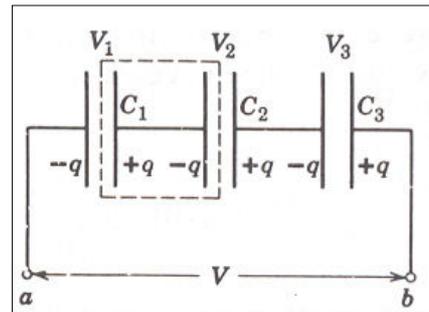
Diferença de potencial:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = q \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

Capacitância equivalente:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)}$$

$$V_1 = \frac{q}{C_1} \quad V_2 = \frac{q}{C_2} \quad V_3 = \frac{q}{C_3}$$



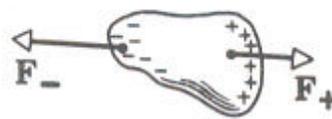
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Cargas superficiais induzidas – eletricidade estática

PEN 5019



Bastão carregado

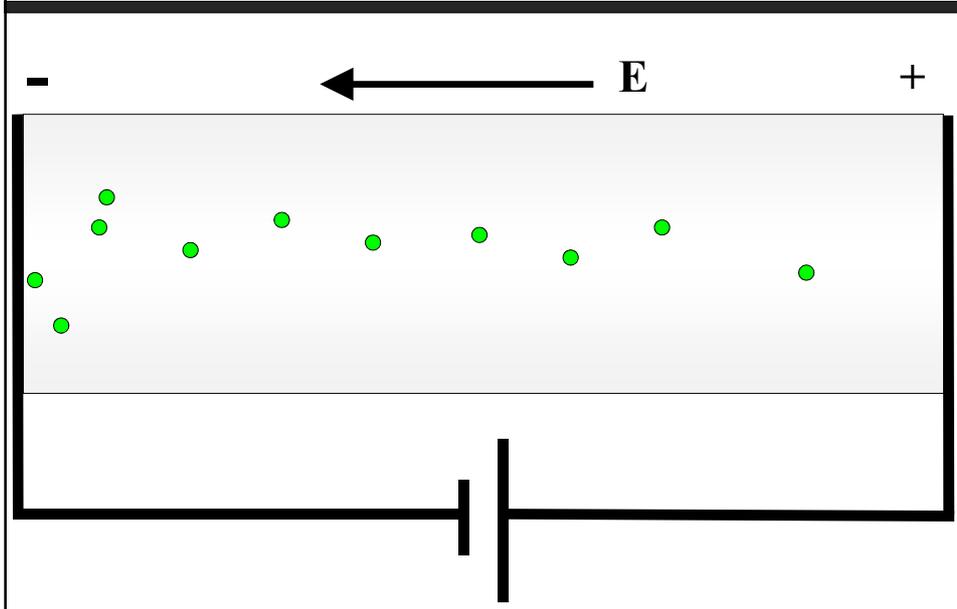


Papel

$$F_- > F_+$$

5) CORRENTE E RESISTÊNCIA ELÉTRICA

PEN 5019



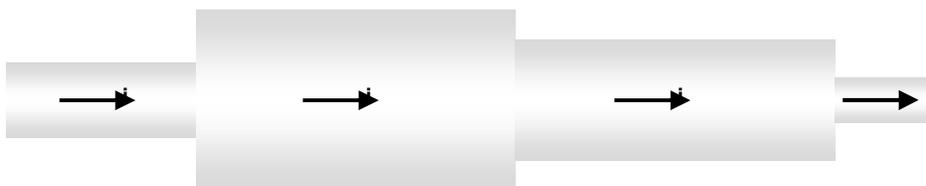
CORRENTE ELÉTRICA

PEN 5019

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (A)$$

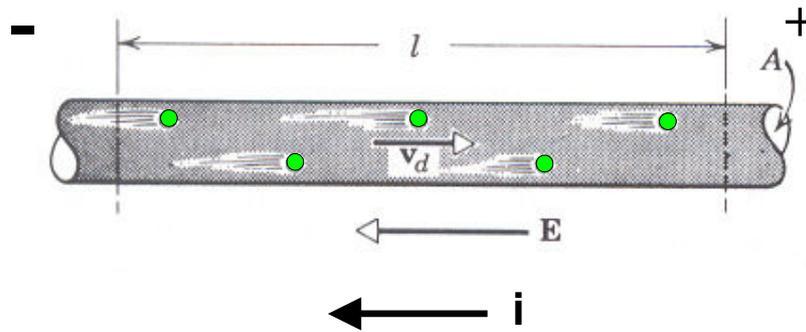
$$1 A = \frac{1 C}{1 s}$$

A corrente i tem o mesmo valor em qualquer seção reta do condutor!



Sentido da corrente

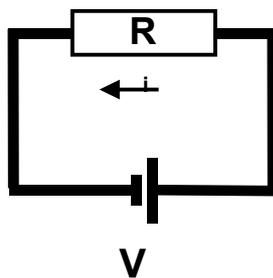
PEN 5019



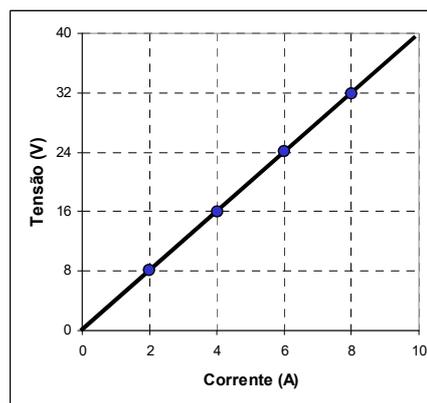
RESISTÊNCIA ELÉTRICA E LEI DE OHM

PEN 5019

Condutor metálico



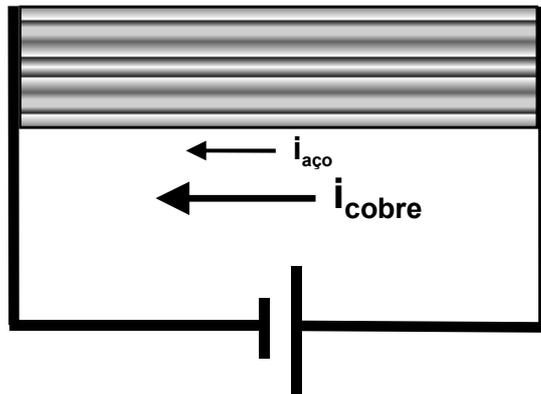
$$\begin{aligned} V_1 &\rightarrow i_1 \\ V_2 &\rightarrow i_2 \\ V_3 &\rightarrow i_3 \\ V_4 &\rightarrow i_4 \end{aligned}$$



$$R = \frac{V}{i} \quad (\Omega)$$

RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE

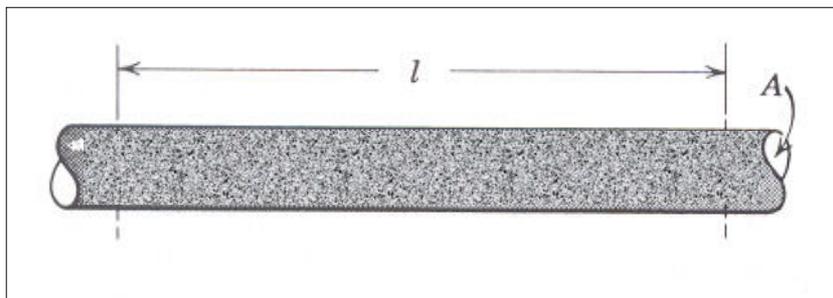
PEN 5019



$$i_{\text{cobre}} \gg i_{\text{aço}}$$

RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE

PEN 5019



$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (\Omega)$$

A resistividade ($\Omega \cdot m$) é uma propriedade específica de cada substância, e não de uma amostra particular da mesma.

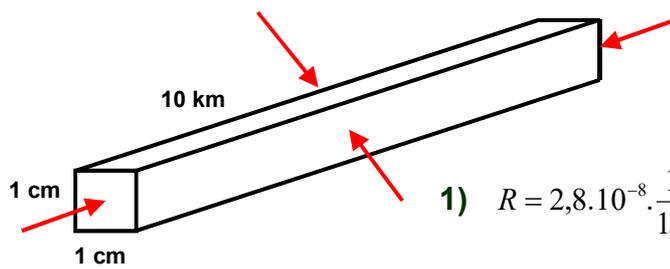
EXEMPLO

PEN 5019

Uma barra retangular de alumínio tem por dimensões 10 km x 1 cm x 1 cm.

- 1) Qual é o valor da resistência medida entre duas faces quadradas?
- 2) Qual é o valor da resistência medida entre duas faces retangulares?

Solução:



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

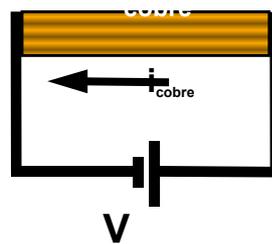
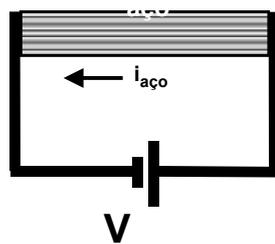
$\rho_{(Al)} = 2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

1) $R = 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{1,0 \cdot 10^{-4}} = 2,8 \Omega$

2) $R = 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-2}}{100} = 2,8 \cdot 10^{-12} \Omega$

LEI de OHM

PEN 5019



$$i_{aço} \ll i_{cobre}$$

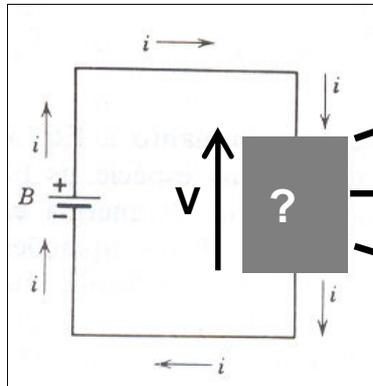
$$i_{aço} = \frac{V}{R_{aço}}$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (\Omega)$$

$$i_{cobre} = \frac{V}{R_{cobre}}$$

TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

PEN 5019



1) motor: $E \rightarrow W_{\text{mecânico}}$

2) bateria: $E \rightarrow E_{\text{química}}$

3) resistor: $E \rightarrow \text{calor}$
(Efeito Joule)

Potência: $P = V \cdot i \quad \left(\frac{J}{s} = W \right) \quad P = R \cdot i^2 = \frac{V^2}{R} \quad (W)$

ENERGIA: $W = P \cdot t$ [W.s = J]

PEN 5019

Exemplo:

Qual o valor da potência dissipada em um resistor para aquecimento com resistência de 12Ω sabendo-se que a diferença de potencial entre os seus terminais é de 110 V ? E a energia consumida em 4 horas?

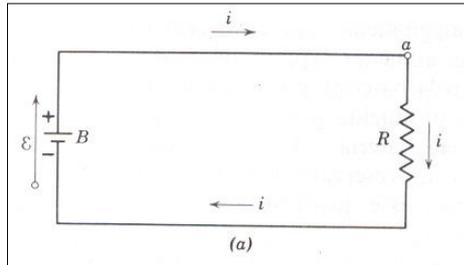
Solução:

$$P = R \cdot i^2 = \frac{V^2}{R} = \frac{110^2}{12} = 1008 \text{ W}$$

$$W = P \cdot t = 1008 \text{ W} \cdot 4 \text{ h} = 4032 \text{ W.h} = 4,032 \text{ kW.h}$$

6) FORÇA ELETROMOTRIZ

PEN 5019



Fontes de f.e.m.:

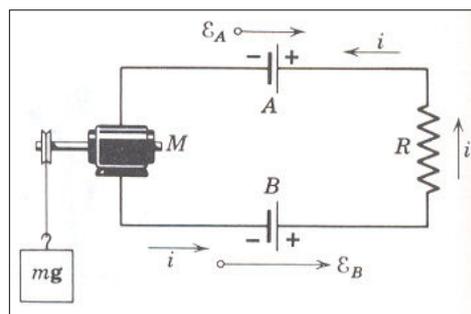
- baterias
- geradores
- termopares
- células solares
- etc.

Fontes de f.e.m.:

Energia_(química, mecânica etc.) ↔ E_{elétrica}

FORÇA ELETROMOTRIZ

PEN 5019



Energia química B

W realizado pelo motor

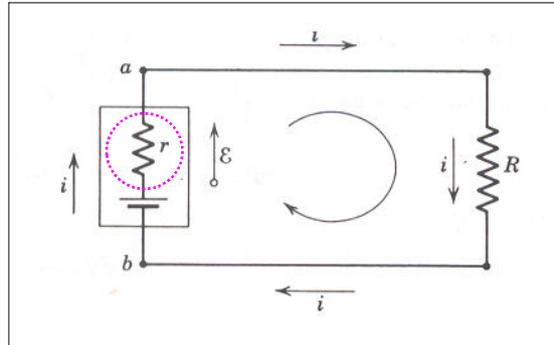
Calor produzido em R

E_{química} armazenada em A

FORÇA ELETROMOTRIZ

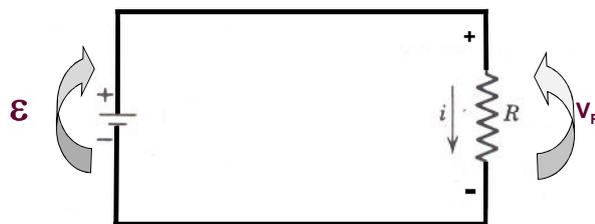
PEN 5019

Todas as fontes de f.e.m. possuem uma resistência intrínseca r , que não pode ser eliminada.



7) CIRCUITOS ELÉTRICOS

PEN 5019



Lei das Malhas (2ª Lei de Kirchhoff):

"A soma algébrica das variações de potencial ao longo de um percurso fechado é igual a zero."

$$\varepsilon - V_R = 0 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon - R \cdot i = 0 \quad \Rightarrow \quad i = \frac{\varepsilon}{R}$$

EXEMPLO – LIGAÇÃO SÉRIE

PEN 5019

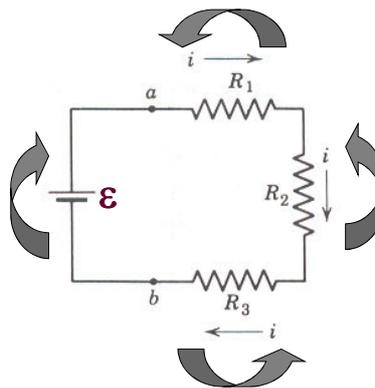
Qual a resistência R equivalente do conjunto de resistores abaixo?

Solução:

$$\varepsilon - R_1.i - R_2.i - R_3.i = 0$$

$$i = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$



EXEMPLO

PEN 5019

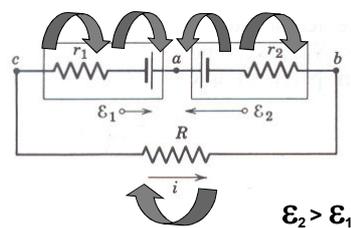
Qual o valor da corrente no circuito abaixo se $\varepsilon_1 = 2,0 \text{ V}$, $\varepsilon_2 = 4,0 \text{ V}$, $r_1 = 1,0 \Omega$, $r_2 = 2,0 \Omega$ e $R = 5,0 \Omega$?

Solução:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - r_1.i - R.i - r_2.i = 0$$

$$i = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{r_1 + R + r_2}$$

$$i = \frac{4,0 - 2,0}{1,0 + 5,0 + 2,0} = 0,25 \text{ A}$$



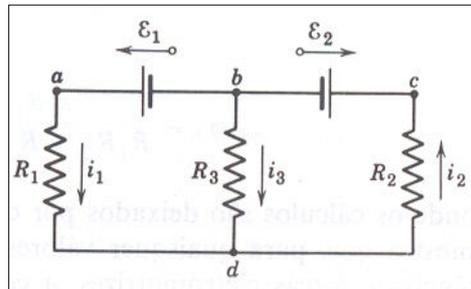
Tensão nos terminais da 2ª bateria:

$$V_{ab} = \varepsilon_2 - r_2.i$$

$$V_{ab} = 4,0 - 2,0 \cdot 0,25 = 3,5 \text{ V}$$

CIRCUITOS DE MAIS DE UMA MALHA

PEN 5019



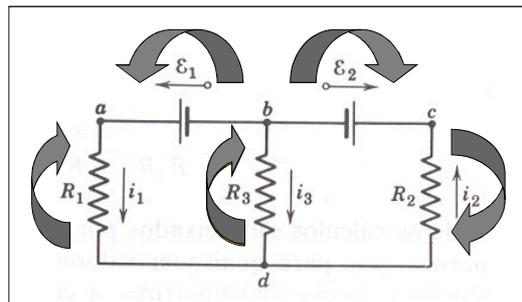
Lei dos Nós (1ª Lei de Kirchhoff):

"A soma algébrica das correntes em cada nó é igual a zero."

$$i_1 + i_3 - i_2 = 0$$

CIRCUITOS DE MAIS DE UMA MALHA

PEN 5019



$$\begin{cases} i_1 + i_3 - i_2 = 0 \\ R_1 \cdot i_1 - \varepsilon_1 - R_3 \cdot i_3 = 0 \\ R_3 \cdot i_3 + \varepsilon_2 + R_2 \cdot i_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow i_1, i_2, i_3$$

EXEMPLO – LIGAÇÃO EM PARALELO

PEN 5019

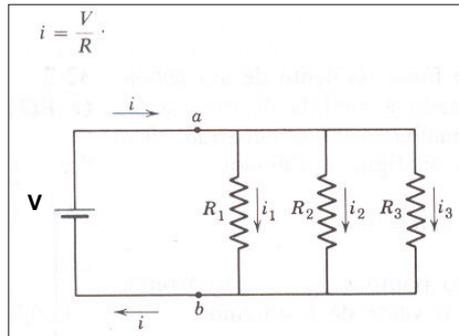
Qual a resistência R equivalente do conjunto de resistores abaixo?

Solução:

$$i_1 = \frac{V}{R_1} \quad i_2 = \frac{V}{R_2} \quad i_3 = \frac{V}{R_3}$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$i = V \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$



$$\frac{1}{R} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

8) CAMPO MAGNÉTICO

PEN 5019

Magnésia (Ásia Menor): certas "pedras" (magnetita) podiam atrair pedaços de ferro.

Terra: ímã natural (ação sobre agulha imantada das bússolas é conhecida desde os tempos antigos).

Oersted (1820): a corrente elétrica que percorre um fio produz efeitos magnéticos (pode mudar a orientação da agulha de uma bússola).



Eletricidade + Magnetismo

(antes eram tratados separadamente)



Hans Christian Ørsted
(1777-1851)

CAMPO MAGNÉTICO

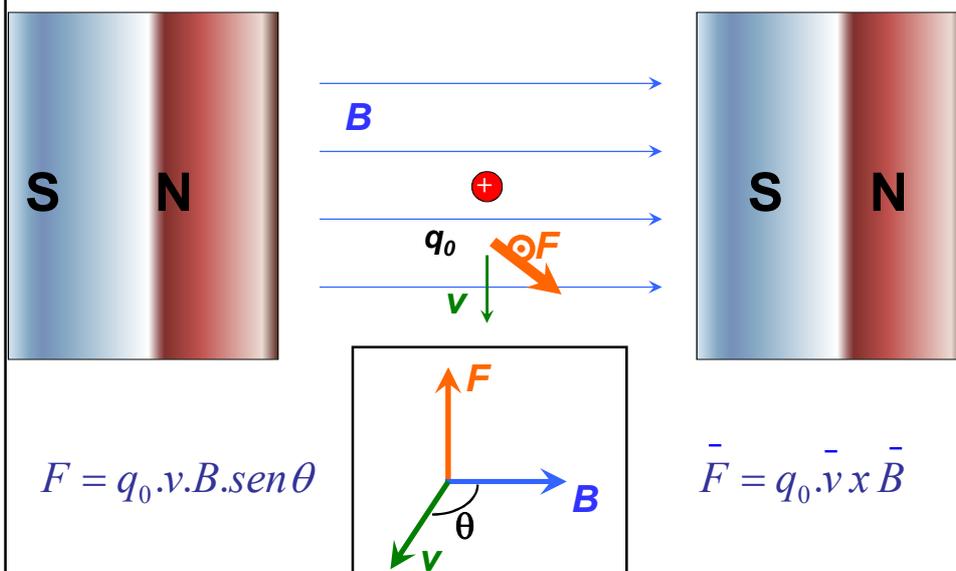
PEN 5019

No espaço que circunda um ímã ou um condutor percorrido por uma corrente elétrica existe um campo magnético, cujo vetor básico é denominado indução magnética (**B**).

Unidade de B: T = Wb/m² (1 T = 10⁴ Gauss)

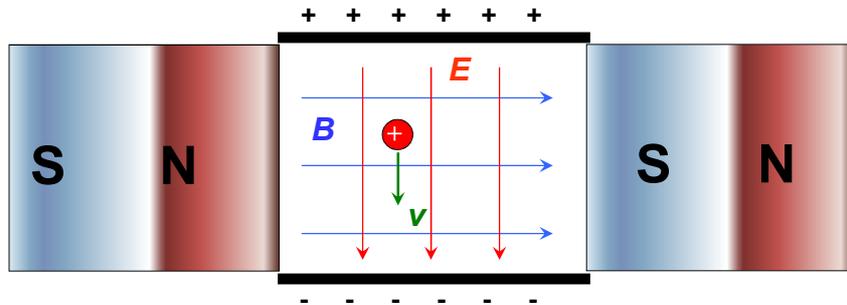
FORÇA

PEN 5019



FORÇA

PEN 5019

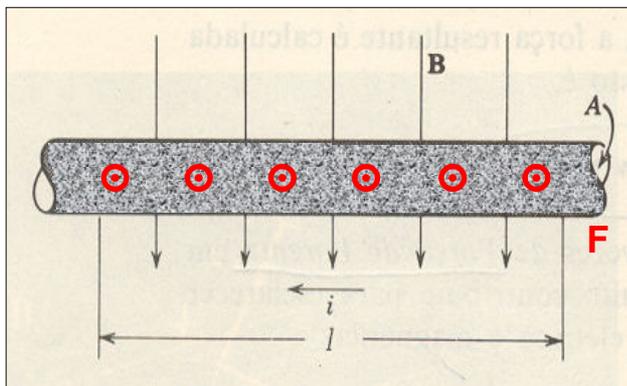


$$\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E} + q_0 \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

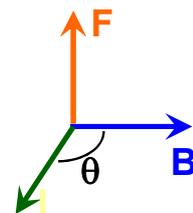
Força de Lorentz

Força sobre um fio percorrido por corrente elétrica

PEN 5019

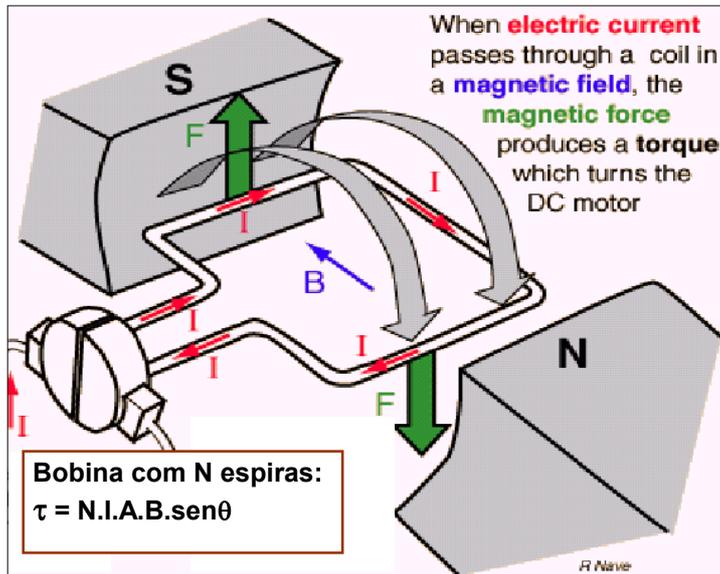


$$F = i \cdot l \cdot B \cdot \text{sen} \theta \quad \vec{F} = i \vec{l} \times \vec{B}$$



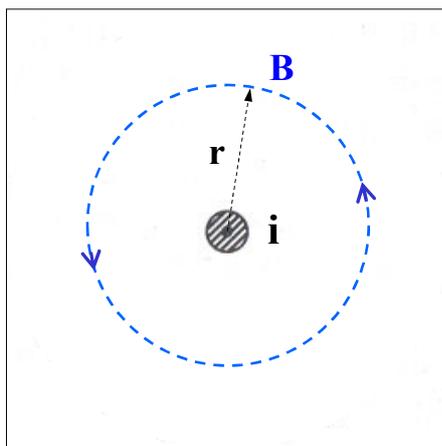
Torque sobre uma espira de corrente

PEN 5019



Valor de B nas proximidades de um fio longo

PEN 5019



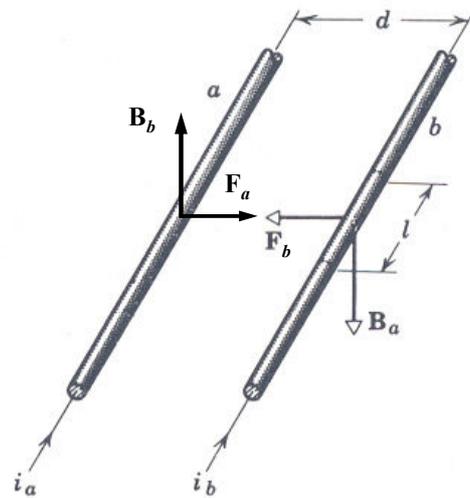
$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

(cte. permeabilidade)

Interação entre 2 condutores paralelos

PEN 5019



$$B_a = \frac{\mu_0 \cdot i_a}{2\pi \cdot d}$$

$$F_b = i_b \cdot l \cdot B_a$$

$$B_b = \frac{\mu_0 \cdot i_b}{2\pi \cdot d}$$

$$F_a = i_a \cdot l \cdot B_b$$

Interação entre 2 condutores paralelos

PEN 5019

