




1



Instituto Superior de
Engenharia do Porto

FÍSICA
APLICADA
LEI
2020-2021

As fontes da tecnologia da informação

► Temática 1

- Natureza da carga elétrica.
- Lei de Coulomb, Campo Elétrico.
- Linhas de campo Elétrico.
- Fluxo elétrico, Lei de Gauss
- Potencial eletrostático, Linhas equipotenciais.
- Energia elétrica, diferença de potencial e trabalho de uma força elétrica.

2

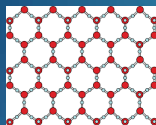


Natureza da carga elétrica

3

Natureza da carga Elétrica

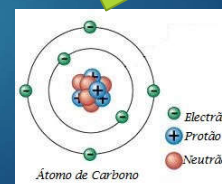
A matéria é constituída por átomos



O átomo é constituído por partículas elementares



Elétrões (-)
Protões (-)



- A carga elétrica é uma propriedade intrínseca das partículas fundamentais de que é feita a matéria, é uma propriedade associada à própria existência das partículas.

4

Carga elétrica

Propriedades:

- ▶ Conservação da carga
 - ▶ A carga elétrica não se cria nem se destrói, só se transfere.
 - ▶ A soma algébrica de todas as cargas num sistema fechado é constante.
- ▶ Quantificação da carga
 - ▶ Qualquer carga elétrica, positiva ou negativa é sempre um múltiplo inteiro da carga elementar $Q = N q$
onde Q é a carga total, N o número de partículas e q a carga elementar.

Carga elementar $\rightarrow q_e = 1,60217653(14) \times 10^{-19} \text{ C}$

Coulomb [C] \rightarrow unidade de carga elétrica no SI

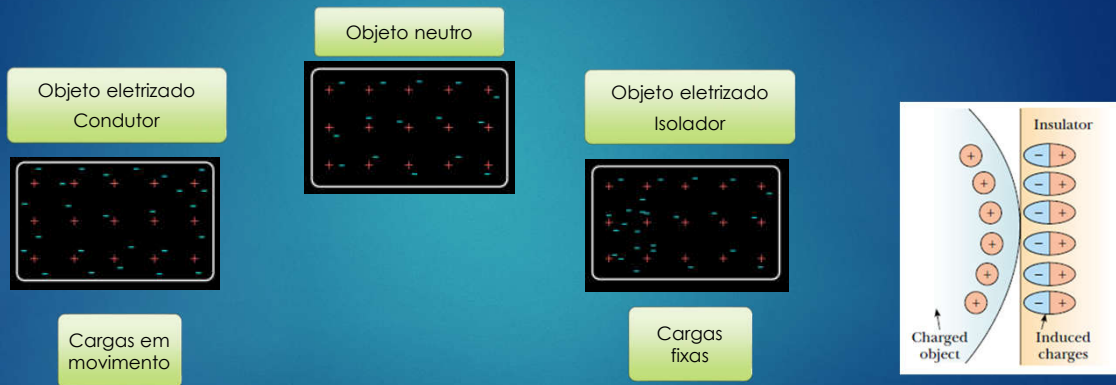
5

Eletricamente carregado



6

Eletricamente carregado

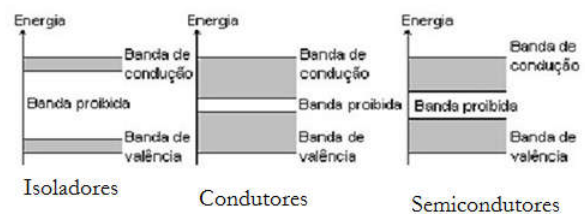


7

Condutores e isoladores

Os materiais podem ser classificados de acordo com a facilidade com a qual as cargas elétricas se movem no seu interior

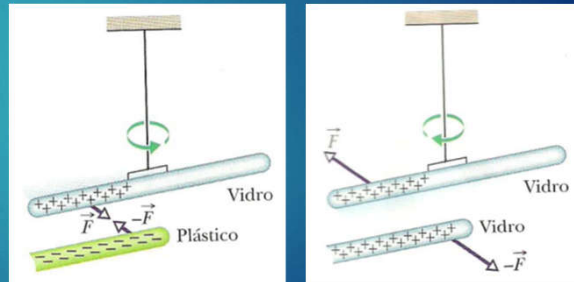
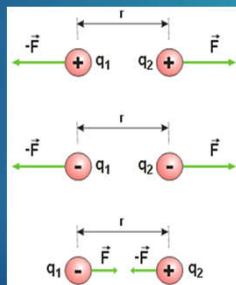
- ▶ Condutores (alta densidade de elétrons livres) as cargas movem-se facilmente
- ▶ Isoladores (baixa densidade de elétrons livres) as cargas são fixas
- ▶ Semicondutores (gap de energia ou banda proibida)
- ▶ Supercondutores



8

Atração/repulsão

- Cargas com o mesmo sinal repelem-se, cargas de sinais opostos atraem-se.

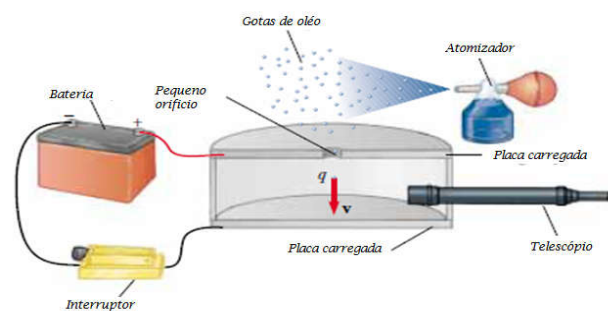


9

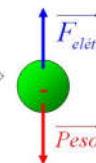
Experiência de Milikan

Resultados de várias experiências (entre as quais se destaca a de Millikan) mostraram que a carga dos iões é sempre um múltiplo inteiro de uma dada carga a que se chamou **carga elementar**.

- $q_e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$



$$\begin{aligned} \text{Equilíbrio} &\Rightarrow F_{\text{Res}} = 0 \\ P = F_{\text{elét}} &\Rightarrow mg = qE \Rightarrow \\ q &= \frac{mg}{E} = \frac{mgd}{V_{AB}} \end{aligned}$$



10

Força eletrostática entre duas cargas pontuais → Lei de Coulomb

- A interação elétrica entre duas partículas carregadas eletricamente pode ser determinada pela seguinte equação:

$$|\vec{F}_e| = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

onde k_e é definida como:

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Constante de Coulomb

$$k_e = 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

Permitividade do vazio

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

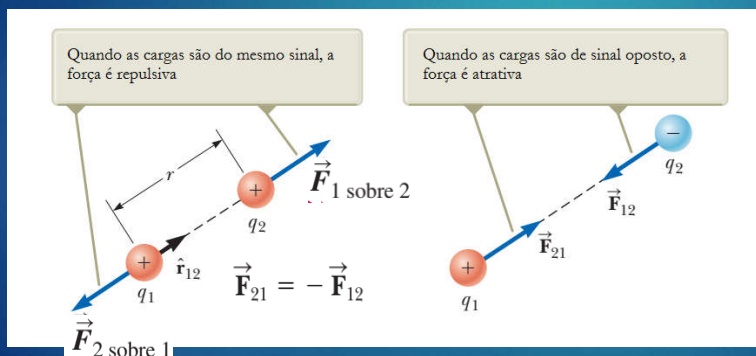
- Lei Gravitação Universal:

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2}$$

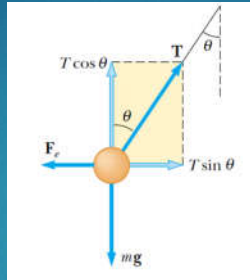
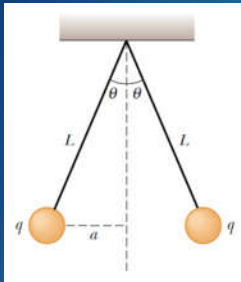
11

$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$

Lei de Coulomb



12



Pêndulo Elétrico

$$\sum F_x = T \sin \theta - F_e = 0 \rightarrow T \sin \theta = F_e$$

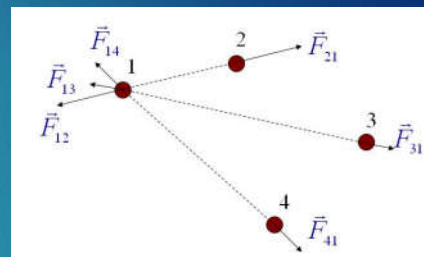
$$\sum F_y = T \cos \theta - mg = 0 \rightarrow T \cos \theta = mg$$

$$\tan \theta = \frac{F_e}{mg} \rightarrow F_e = mg \tan \theta$$

13

Princípio da superposição das forças

As forças electrostáticas obedecem ao princípio de sobreposição, isto é, a força resultante na partícula 1 devido a presença de n partículas com cargas na vizinhança, é igual ao somatório vetorial de todas as forças que exercem individualmente na partícula 1



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \dots + \vec{F}_{1n}$$

14

Campo Elétrico de cargas pontuais

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



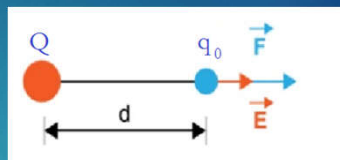
Typical Electric Field Values

Source	E (N/C)
Fluorescent lighting tube	10
Atmosphere (fair weather)	100
Balloon rubbed on hair	1 000
Atmosphere (under thundercloud)	10 000
Photocopier	100 000
Spark in air	>3 000 000
Near electron in hydrogen atom	5×10^{11}

15

Campo Elétrico de cargas pontuais

O campo resultante num ponto é o somatório **vetorial** de todos os campos individualmente determinados.



Módulo do campo elétrico

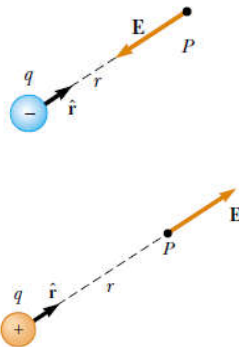
$$|\vec{E}| = k \frac{Q}{d^2}$$

$Q \rightarrow$ carga que dá origem ao campo elétrico
 $q_0 \rightarrow$ carga de prova (positiva)
 $\vec{R} \rightarrow$ vetor unitário diretor

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

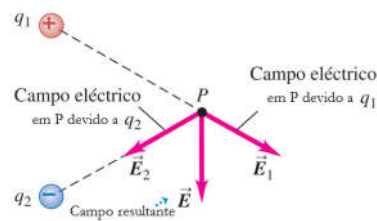
16

Campo elétrico de cargas pontuais

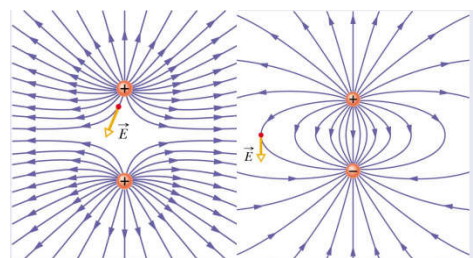
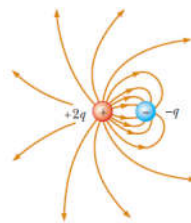
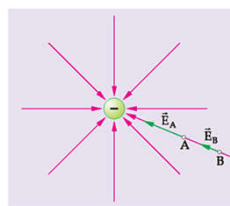
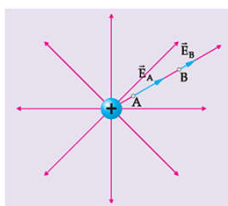


► Num qualquer ponto P, o campo elétrico total devido a um conjunto de cargas, é igual à soma de todos os vetores de campo elétrico, de todas as cargas envolvidas.

$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$



17



Linhas de campo elétrico

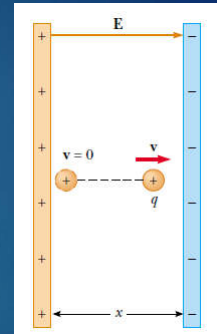
18

Carga pontual num Campo elétrico constante

- ▶ Se o campo E é **uniforme**, ou seja constante em magnitude e direção, a **aceleração é constante**.
- ▶ Se uma **carga positiva** for largada neste campo ela movimenta-se no **mesmo sentido do campo**, se for **negativa** movimenta-se no **sentido contrário ao campo**.

$$F_e = qE = ma$$

$$a = \frac{qE}{m}$$



19

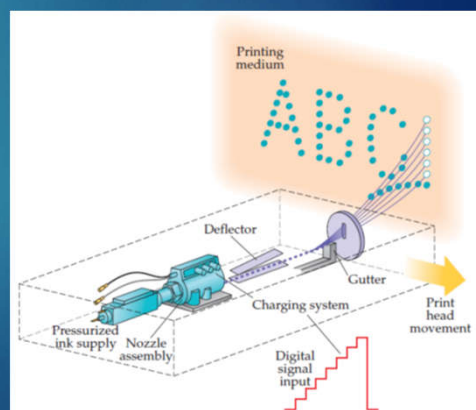
$$x_f = v_i t$$

$$y_f = \frac{1}{2} a_y t^2 = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m_e} t^2$$

$$v_x = v_i = \text{constant}$$

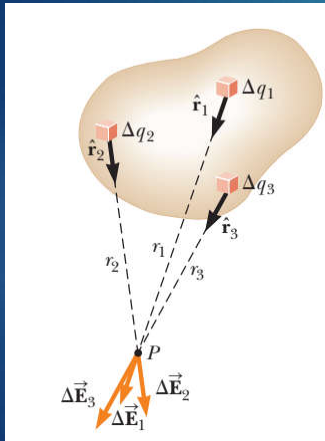
$$v_y = a_y t = -\frac{eE}{m_e} t$$

Aplicações tecnológicas



20

Campo elétrico produzido por uma distribuição contínua de carga



$$\vec{E} \approx k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

$$\vec{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

Densidade de carga volúmica

$$\rho \equiv \frac{Q}{V}$$

Densidade de carga de superfície

$$\sigma \equiv \frac{Q}{A}$$

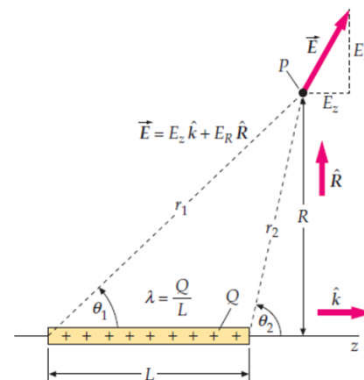
Densidade de carga linear

$$\lambda \equiv \frac{Q}{\ell}$$

$$dq = \rho dV \quad dq = \sigma dA \quad dq = \lambda d\ell$$

21

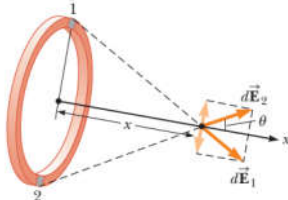
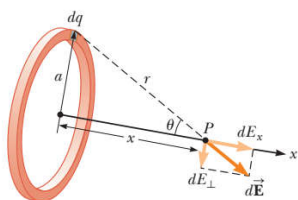
Exemplo: Campo elétrico produzido por uma linha de carga



$$E_z = \frac{k\lambda}{R} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) = k\lambda \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (r_1 \neq 0) \quad (r_2 \neq 0)$$

$$E_R = -\frac{k\lambda}{R} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) = -k\lambda \left(\frac{\cot\theta_2}{r_2} - \frac{\cot\theta_1}{r_1} \right) \quad (R \neq 0)$$

22



$$dE_x = k_e \frac{dq}{r^2} \cos \theta = k_e \frac{dq}{a^2 + x^2} \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{x}{r} = \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$$

$$dE_x = k_e \frac{dq}{a^2 + x^2} \left[\frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} \right] = \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} dq$$

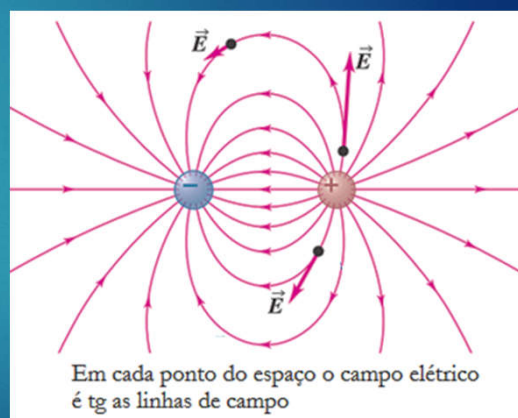
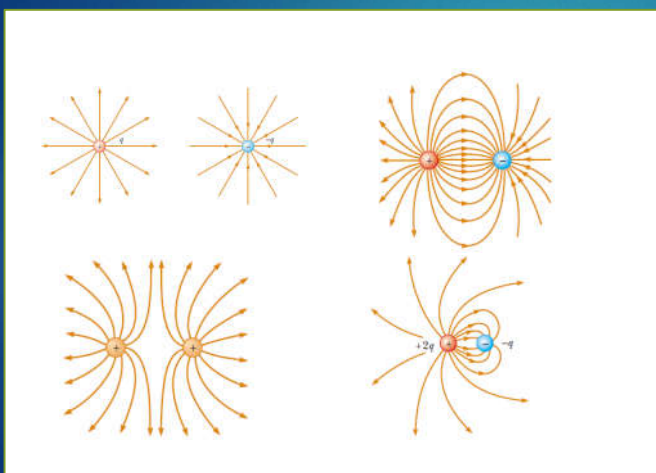
$$E_x = \int \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} dq = \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \int dq$$

$$E = \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} Q$$

Exemplo: Campo elétrico produzido por um anel carregado uniformemente

23

Linhas de campo elétrico



24

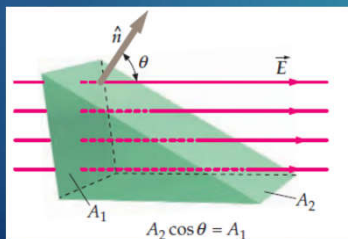
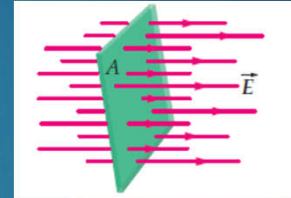
Lei de Gauss

► Fluxo elétrico, ϕ

“Quantidade” de linhas de campo elétrico

que atravessa uma dada superfície, na componente normal à superfície

$$\phi = EA$$



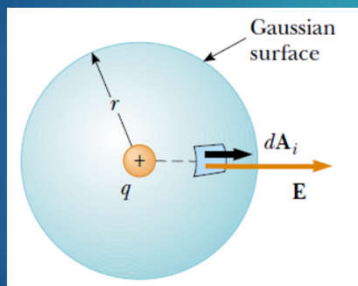
$$\phi = \vec{E} \cdot \hat{n} A = EA \cos \theta = E_n A$$

$$E_n = E \cos \theta$$

25

Lei de Gauss

Relaciona o fluxo elétrico devido à carga numa superfície fechada e o campo elétrico em qualquer ponto da superfície



$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint E dA = E \oint dA$$

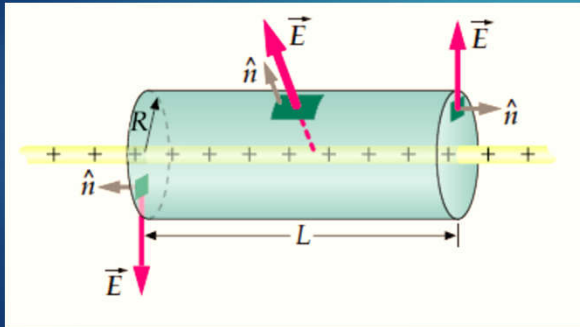
$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

► Pela lei de Gauss, o fluxo através de qualquer superfície fechada é igual à carga contida dentro da superfície dividida por ϵ_0

26

Lei de Gauss

Campo elétrico devido a uma
linha infinita de carga



$$\phi_{\text{sup.curva}} = E_R 2\pi RL$$

$$\phi_{\text{direita}} = 0$$

$$\phi_{\text{esquerda}} = 0$$

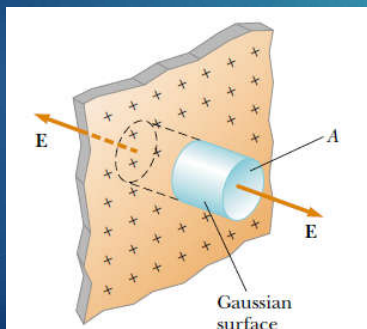
$$\phi_{\text{total}} = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0}$$

$$E_R 2\pi RL = \frac{\lambda L}{\epsilon_0} \Rightarrow E_R = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{R}$$

27

Lei de Gauss - Campo elétrico num plano infinito

Consideremos um plano infinito com
uma distribuição de carga uniforme
por unidade de área



Com uma carga uniforme por unidade de área

Pela Lei de Gauss, o Campo elétrico devido ao
plano uniforme, será:

$$\Phi_E = 2EA = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

28

Energia Potencial Elétrica (U)

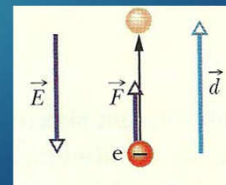
A força elétrica é uma força conservativa → o princípio de conservação de energia mecânica num sistema fechado pode ser aplicado.

Se uma partícula muda de um estado inicial para um estado final, a força eletrostática que atua sobre a partícula realiza trabalho, logo:

$$\Delta U = U_f - U_i = -W.$$

Como a força elétrica é conservativa temos:

$$E_{c_f} + U_f = E_{c_i} + U_i$$



29

Potencial Elétrico (V)

O potencial elétrico, em qualquer ponto de um campo elétrico, é dado pela razão entre a energia potencial e carga.

$$V = \frac{U}{q_0} \rightarrow \text{grandeza escalar, unidade no SI, Volt}$$

A diferença de potencial, entre dois pontos, é definida como a variação da energia potencial dividida pela carga.

$$V_B - V_A = \frac{U_B - U_A}{q}$$

A diferença de potencial, é igual ao trabalho por unidade de carga, de um agente externo para deslocar uma carga entre A e B, sem alterar a energia cinética.

$$\frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = -\frac{\Delta U}{q_0} = -\left(\frac{U_b}{q_0} - \frac{U_a}{q_0}\right) = -(V_b - V_a) = V_a - V_b$$

30

Potencial Elétrico

$$\Delta V = -E \int_A^B ds = -Ed$$

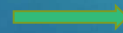


$$E = \frac{|V_B - V_A|}{d}$$

Superfície equipotencial, é qualquer superfície constituída por uma distribuição continua, que possuam o mesmo potencial.

Num campo E, conservativo

$$V_B - V_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$



$$V_B - V_A = k_e q \left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right]$$

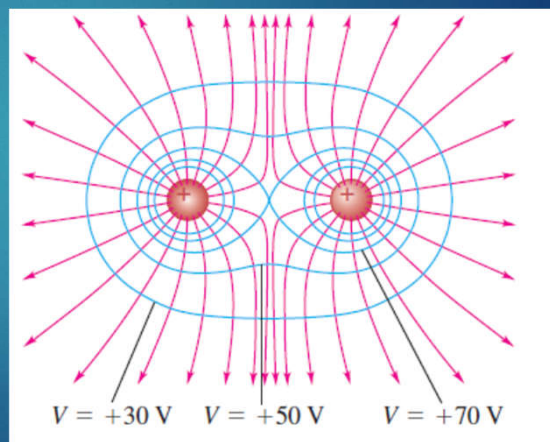
$$V = k_e \frac{q}{r}$$

Potencial elétrico criado por uma carga pontual a uma distância r da carga.

31

Linhas Equipotenciais

Superfície equipotencial, é qualquer superfície constituída por uma distribuição continua, que possuam o mesmo potencial.



32

Bibliografia

Halliday e Resnick, "Fundamentos de Física - Eletromagnetismo", cap. 21, vol 3, 9ª Edição