

# Campo Elétrico

Adaptado de:  
 "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics",  
 R. A. Serway and J. W. Jewett, Jr., (Cengage)

1


1

## 1. Cargas Elétricas


Experiências simples mostram a existência de forças elétricas e cargas elétricas

Exemplos:

- uma vara de âmbar friccionada com papel atrai pedacinhos de papel
- vidro friccionado com seda
- borracha friccionada com lã
- cabalo friccionado com borracha



Os materiais ficam eletricamente carregados



fricção
condução
indução

2

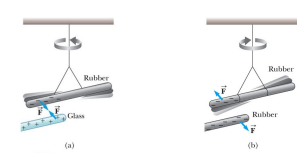
2

### I. Existem dois tipos de cargas elétricas

[B. Franklin, 1706-1790]

- cargas negativas são do tipo da carga dos eletrões
- cargas positivas são do tipo da carga dos prótons

**cargas com sinais contrários atraem-se**  
**cargas com o mesmo sinal repelem-se**



3


3

### II. Conservação da carga elétrica:

a carga elétrica total de um sistema isolado é conservada

Exemplo:  
 não existe criação de carga no processo de fricção de um objeto com outro, a eletrização resulta de uma transferência de carga de um objeto para o outro

Uma vara de vidro é friccionada com seda:  
 eletrões são transferidos do vidro para a seda,  
 cada eletrão adiciona um carga negativa à seda  
 e uma carga positiva igual é deixada na vara



### III. Quantização da carga elétrica:

a carga elétrica  $q$  é quantizada, i.e., toma valores discretos,

$$q = \pm Ne$$

[R. Millikan em 1909]

$N$  é inteiro,  
 $e$  é a unidade de carga fundamental,  $e = 1.602\ 176\ 5 \times 10^{-19}$  C

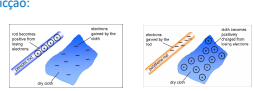
Electrão:  $q = -e$ ; Protão:  $q = +e$

4

4

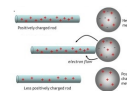
### Formas de carregamento: Fricção, Condução, Indução

**Fricção:**




Carga negativa: os objetos ganham eletrões  
 Carga positiva: os objetos perdem eletrões

**Condução:**



[Nota: apenas os eletrões se movem, os prótons ficam fixos]



5

5

## 2. Carregamento por indução

### Classificação de materiais

**Condutores:**

Condutores elétricos são materiais em que alguns dos eletrões são livres, não estão ligados aos átomos e podem mover-se de forma relativamente livre através do material

Quando um condutor é carregado numa pequena região, a carga distribui-se imediatamente sobre toda a superfície do material

Exemplos de bons condutores: cobre, alumínio e prata

**Isoladores**

Isoladores elétricos são materiais em que todos os eletrões estão ligados aos átomos, não podem mover-se de forma relativamente livre através do material

Quando o isolador é carregado numa pequena região, a carga não consegue mover-se para outras regiões do material

Exemplos de bons isoladores: vidro, borracha e madeira

6

6

### Carregamento de condutores por indução

não requer contacto com o objeto que induz a carga

- Começa-se com uma esfera condutora neutra, tem o mesmo número de eletrões e prótons;
- Uma vara carregada é colocada junto da esfera, sem a tocar, os eletrões na esfera são redistribuídos;
- A esfera é ligada à terra por um fio condutor, alguns eletrões saem da esfera através do fio;
- A ligação à terra é removida, existe agora um excesso de carga positiva na esfera, porque existem menos eletrões, as cargas não estão uniformemente distribuídas;
- A vara é removida, os eletrões que ficam na esfera redistribuem-se, a carga está agora uniformemente distribuída, existe uma carga total positiva na esfera.

7

### Reorganização de cargas em isoladores

Processo similar a indução

- Na maior parte das moléculas neutras, o centro de carga positiva coincide com o centro de carga negativa
- Na presença de um objeto carregado, os centros de carga no interior das moléculas são ligeiramente desviados, resultando em mais carga positiva num lado da molécula do que no outro
- A reorganização das cargas no interior das moléculas produz uma camada de carga na parede do isolador

Exemplo:

8

### Unidade de carga elétrica no SI: C, Coulomb

Partículas:

Partícula	Carga (C)	Massa (kg)
Eletrão (e)	$-1.602\ 176\ 5 \times 10^{-19}$	$9.109\ 4 \times 10^{-31}$
Protão (p)	$+1.602\ 176\ 5 \times 10^{-19}$	$1.672\ 62 \times 10^{-27}$
Neutrão (n)	0	$1.674\ 93 \times 10^{-27}$

Carga elétrica mais pequena\*:  $e = 1.602\ 176\ 5 \times 10^{-19}\ C$   
 (\*livre, exceptuando os "quarks" na matéria nuclear)

1 C = carga de  $6.24 \times 10^{18}$  eletrões ou prótons  
 valores típicos de carga são da ordem do  $\mu C$

Carga pontual: designa uma partícula com tamanho zero e que tem carga elétrica  
 Eletrões e prótons são bem descritos como cargas pontuais

9

### 3. Lei de Coulomb [C. Coulomb, 1736-1806]

#### Força elétrica entre duas cargas pontuais estacionárias

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

$\vec{F}_{12}$  é a força exercida pela carga 1 sobre a carga 2

- $q_1$  e  $q_2$  são as cargas
- $r$  é a distância entre as cargas
- $\hat{r}_{12}$  é um vetor unitário dirigido de  $q_1$  para  $q_2$
- $K_e$  é a constante de Coulomb

$\vec{F}_{21}$  é a força exercida pela carga 2 sobre a carga 1

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Partículas com cargas de igual sinal produzem uma força repulsiva entre elas  
 [semelhante com duas cargas negativas]

10

### Lei de Coulomb (cont.)

#### Força elétrica entre duas cargas pontuais estacionárias

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

$\vec{F}_{12}$  é a força exercida pela partícula 1 sobre a partícula 2

$\vec{F}_{21}$  é a força exercida pela partícula 2 sobre a partícula 1

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Partículas com cargas de sinal contrário produzem uma força atrativa entre elas

11

#### Constante de Coulomb:

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

$$K_e = 8.9876 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$$

#### Permitividade do espaço livre, vácuo:

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

12

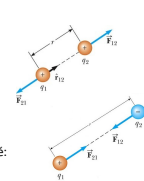
**Lei de Coulomb (resumo)**

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

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

A força elétrica entre duas cargas pontuais estacionárias é:

- proporcional ao produto das cargas,  $q_1$  e  $q_2$
- inversamente proporcional ao quadrado da distância,  $r$ , entre as cargas
- dirigida ao longo da linha que une as cargas
- atrativa se as cargas tiverem sinal contrário, repulsiva se as cargas tiverem o mesmo sinal
- uma força conservativa



13

13

**Princípio de sobreposição**

A força resultante sobre uma carga é igual à soma das forças exercidas sobre ela por todas as outras cargas presentes

$$\vec{F}_1 = \sum_i \vec{F}_{i1}$$


**Exemplo**

Força resultante sobre a carga  $q_3$ :  $\vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$

$$\vec{F}_3 = (F_{13} \cos \alpha - F_{23}) \vec{u}_x + F_{13} \sin \alpha \vec{u}_y$$

$$F_{13} = K_e \frac{|q_1||q_3|}{(\sqrt{2}a)^2}$$

$$F_{23} = K_e \frac{|q_2||q_3|}{a^2}$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$$


14

14

**4. Campo Elétrico**

- A força elétrica é uma força de campo
- As forças de campo atuam através do espaço o efeito é produzido mesmo sem contacto físico entre os objetos
- Faraday desenvolveu o conceito de campo em termos de campos elétricos

[M. Faraday 1791-1867]

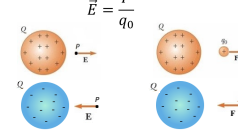
Campo Gravitacional

15

15

**Definição:**

- Existe um **campo elétrico** na região do espaço ao redor de um objeto carregado, o objeto carregado é a **carga fonte**
- Quando outro objeto carregado, a **carga teste**, entra naquele campo elétrico, uma força elétrica atua sobre ele
- O campo elétrico,  $\vec{E}$ , num ponto  $P$  do espaço é definido como a força elétrica,  $\vec{F}$ , que atua numa carga de teste positiva,  $q_0$ , colocada nesse ponto, dividida pela carga de teste

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


- A direção de  $\vec{E}$  é a de uma força que atua numa carga de teste positiva

16

16

**Relação entre força e campo elétrico**

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

$\vec{F}$  é a força elétrica exercida sobre uma carga  $q$  num campo elétrico  $\vec{E}$

- Se a carga  $q$  é positiva, a força e o campo têm o mesmo sentido
- Se a carga  $q$  é negativa, a força e o campo têm sentidos opostos

A relação acima indicada é válida apenas para cargas pontuais  
No caso de objetos extensos a carga e o campo podem variar ao longo do objeto

Unidade de campo elétrico no SI: N/C

17

17

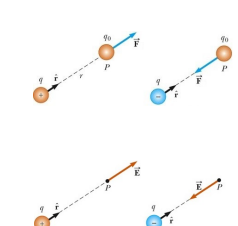
**Campo elétrico produzido por cargas pontuais**

- Força elétrica

$$\vec{F} = K_e \frac{q q_0}{r^2} \hat{r}$$

- Campo elétrico

$$\vec{E} = K_e \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

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


18

18

**Princípio de sobreposição**

Em qualquer ponto  $P$  do espaço, o campo elétrico produzido por um conjunto de cargas é igual à soma dos campos elétricos produzidos pelas cargas individuais

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

$r_i$  é a distância entre a carga  $q_i$  e o ponto  $P$   
 $\hat{r}_i$  é um vetor unitário dirigido da carga  $q_i$  para o ponto  $P$

**Exemplo**  
 Campo elétrico de um dipolo elétrico

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = E \vec{u}_x, \quad E = K_e \frac{2qa}{(y^2 + a^2)^{3/2}}$$

$y \gg a: \quad E \approx K_e \frac{2qa}{y^3}$

19

**5. Campo elétrico de uma distribuição de carga contínua**

- As distâncias entre cargas num conjunto de cargas pode ser muito menor do que a distância entre o conjunto e o ponto  $P$  onde se quer calcular o campo elétrico
- Nesta situação, o sistema de cargas próximas é equivalente a uma carga total,  $Q$ , distribuída de forma contínua ao longo de uma linha,  $L$ , sobre uma superfície,  $S$ , ou através de um volume,  $V$
- Para os elementos de carga individuais

$$\Delta \vec{E} = K_e \frac{\Delta q}{r^2} \hat{r}$$

- Para a distribuição de carga contínua

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

$$\vec{E} = K_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

20

**Carga distribuída uniformemente**

- Densidade de carga linear:  $\lambda = Q/L$
- Densidade de carga superficial:  $\sigma = Q/S$
- Densidade de carga volumica:  $\rho = Q/V$

**Exemplo**  
 Campo elétrico devido a uma vara com carga  $Q > 0$

$$\vec{E} = -E \vec{u}_x, \quad E = K_e \frac{Q}{a(\ell + a)}$$

$a \gg \ell: \quad E \approx K_e \frac{Q}{a^2}$

21

**6. Linhas de Campo Elétrico**

- As linhas de campo permitem representar o campo elétrico de uma forma pictórica
- O campo elétrico  $\vec{E}$  é tangente à linha de campo elétrico em cada ponto, a linha tem uma direção e sentido que são os mesmos do campo elétrico
- O número de linhas por unidade de área através de uma superfície perpendicular às linhas é proporcional à magnitude do campo elétrico naquela região, linhas próximas onde o campo é forte e linhas afastadas onde o campo é fraco

**Exemplo**

- A densidade de linhas através da superfície A é maior do que através da superfície B, logo a magnitude do campo elétrico é maior na superfície A do que na superfície B
- As linhas em diferentes pontos apontam em direções diferentes, logo o campo elétrico é não uniforme

22

**Exemplos de linhas de campo elétrico**

- Carga pontual positiva:  
Linhas de campo radiais dirigidas para fora da carga
- Carga pontual negativa:  
Linhas de campo radiais dirigidas para dentro da carga

23

**Exemplos de linhas de campo elétrico**

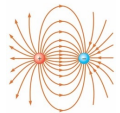
- Carga pontual positiva:  
Linhas de campo radiais dirigidas para fora da carga
- Carga pontual negativa:  
Linhas de campo radiais dirigidas para dentro da carga

**Magnitude do campo elétrico:**  
 $E \propto N/4\pi r^2$

24

- Dipolo elétrico:**  
cargas de igual magnitude e sinal contrário

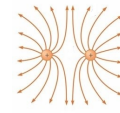
O número de linhas de campo que começa na carga positiva é igual ao número de linhas campo que acaba na carga negativa



- Duas cargas idênticas:**  
cargas de igual magnitude e sinal positivo

O mesmo número de linhas de campo começa em cada carga porque as cargas têm a mesma magnitude

[Similar para duas cargas negativas mas com as linhas de campo a acabar nas cargas]



25

25

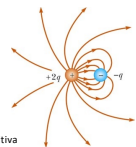
- Duas cargas diferentes:**

A carga positiva tem uma magnitude que é o dobro da magnitude da carga negativa

Duas linhas de campo começam na carga positiva para cada linha de campo que acaba na carga negativa

Metade das linhas de campo que começam na carga positiva terminam numa carga negativa que se considera estar no infinito

A grande distância as linhas de campo são aproximadamente iguais às de uma única carga com valor  $+q$  ( $= +2q - q$ )



26

26

**Regras para desenhar as linhas de campo elétrico**

- As linhas de campo têm de começar numa carga positiva e acabar numa carga negativa, no caso de excesso de um tipo de carga algumas linhas começam ou acabam no infinito
- O número de linhas de campo que começa numa carga positiva ou acaba numa carga negativa é proporcional à magnitude da carga
- Não pode haver cruzamento de linhas de campo

*Nota:* as linhas de campo não são objetos materiais, elas são uma representação pictórica utilizada para descrever o campo elétrico de forma qualitativa

27

27

**7. Movimento de uma partícula carregada num campo elétrico uniforme**

- Quando uma partícula com carga é colocada num campo elétrico ela é atuada por uma força elétrica e adquire uma aceleração:

$$\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E}$$

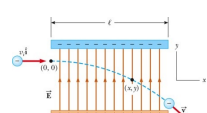
- Se o campo elétrico é uniforme a aceleração é constante
- Se a partícula tem carga positiva a aceleração é no sentido do campo
- Se a partícula tem carga negativa a aceleração é no sentido contrário do campo

28

28

**Exemplo:**

Elétron num campo elétrico uniforme



$$\vec{F} = -e\vec{E} = m\vec{a}$$

$$\vec{a} = -a\vec{u}_y, \quad a = \frac{eE}{m}$$

$$\vec{v} = v_x\vec{u}_x + v_y\vec{u}_y$$

$$v_x = v_i, \quad v_y = -at$$

$$\vec{r} = x\vec{u}_x + y\vec{u}_y$$


$$x = v_it, \quad y = -\frac{1}{2}at^2$$

$$y = -\frac{eE}{2mv_i^2}x^2$$


29

29

**Lei de Coulomb**



C. Coulomb  
1736 – 1806



Balança de torção

30

30