

## Capítulo 22: CARGA ELÉTRICA

A intensidade da interação elétrica de uma partícula com objetos ao seu redor depende da sua **carga elétrica**, que pode ser tanto positiva quanto negativa. Cargas com o mesmo sinal se repelem e cargas com sinais contrários se atraem. Um objeto com quantidades iguais dos dois tipos de carga é eletricamente neutro, ao passo que um objeto com um desequilíbrio está eletricamente carregado.

**Condutores** são materiais nos quais um número significativo de partículas carregadas (elétrons em metais) está livre para se mover, as partículas carregadas em **não-condutores**, ou **isolantes**, não estão livres para se moverem. Quando a carga se move através de um material, dizemos que existe uma **corrente elétrica** no material.

O **Coulomb** e o **Ampère** A unidade SI de carga é o **Coulomb** (C). Ele é definido em termos da unidade de corrente, o ampère (A), como a carga que passa por um determinado ponto em 1 segundo quando existe uma corrente de 1A nesse ponto.

**Lei de Coulomb** A *Lei de Coulomb* descreve a força eletrostática entre pequenas cargas elétricas (pontuais)  $q_1$  e  $q_2$  em repouso (ou praticamente em repouso) e separadas por uma distância  $r$ :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{lei de Coulomb}) \quad (22.4)$$

Nesta equação,  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$  é a **constante de permissividade**, e  $1/4\pi\epsilon_0 = k = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ .

A força de atração ou repulsão entre cargas pontuais em repouso atua ao longo da linha que une as duas cargas. Se mais de duas cargas estiverem presentes, a Eq. 22.4 se aplica a cada par de cargas. A força resultante sobre cada carga neste caso é obtida, usando o princípio da superposição, como a soma vetorial das forças exercidas sobre a carga por todas as outras.

Os dois teoremas das cascas para a eletrostática são

*Uma casca com carga uniforme atrai ou repele uma partícula carregada localizada fora da casca como se toda a carga da casca estivesse concentrada no seu centro.*

*Se uma partícula carregada estiver localizada dentro de uma casca com carga uniforme, a força eletrostática resultante da casca sobre a partícula será nula.*

**A carga Elementar** A carga elétrica é **quantizada**: qualquer carga pode ser escrita como  $ne$ , onde  $n$  é um inteiro positivo ou negativo e  $e$  é uma constante da natureza chamada de **carga elementar**

(aproximadamente  $(1,60 \times 10^{-19} C)$ ). A carga elétrica se **conserva**: a carga líquida (algébrica) de qualquer sistema isolado não pode variar.

## EXERCÍCIOS

### Seção 22.4 – A Lei de Coulomb

1E - Qual deve ser a distância entre a carga pontual  $q_1 = 26,0 \mu C$  e a carga pontual  $q_2 = -47 \mu C$  para que a força eletrostática entre elas tenha uma intensidade de  $5,70 N$ ?

2E - Uma carga pontual de  $+3,00 \times 10^{-6} C$  e está distante  $12,0 cm$  de uma segunda carga pontual de  $-1,50 \times 10^{-6} C$ . Calcule a intensidade da força sobre cada carga.

3E - Duas partículas igualmente carregadas, mantidas a uma distância de  $3,2 \times 10^{-3} m$ , são soltas a partir do repouso. Observa-se que a aceleração inicial da primeira partícula é de  $7,0 m/s^2$  e que a da segunda é de  $9,0 m/s^2$ . Se a primeira partícula for de  $6,3 \times 10^{-7} kg$ , quais serão (a) a massa da segunda partícula e (b) a intensidade da carga de cada partícula?

4E - Duas esferas condutoras isoladas idênticas 1 e 2 possuem cargas iguais e estão separadas por uma distância que é grande, comparada com seus diâmetros (Fig.22.16a). A força eletrostática atuando na esfera 2 devido à esfera 1 é  $\vec{F}$ . Supondo agora que uma terceira esfera idêntica, a esfera 3, tendo um cabo isolante e inicialmente neutra, toque primeiro a esfera 1 (Fig.22.16b), depois a esfera 2 (Fig.22.16c) e finalmente seja removida (Fig.22.16d). Em termos da intensidade  $F$ , qual a intensidade da força eletrostática  $\vec{F}'$  que atua agora sobre a esfera 2?

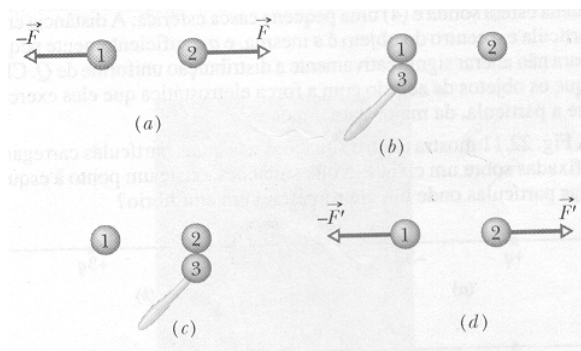


FIG. 22.16

5P - Na Fig.22.17, (a) quais as componentes horizontais e (b) quais as componentes verticais da força eletrostática resultante sobre a partícula carregada no canto inferior esquerdo do quadrado se  $q = 1,0 \times 10^{-7} \text{ C}$  e  $a = 5,0 \text{ cm}$ ?

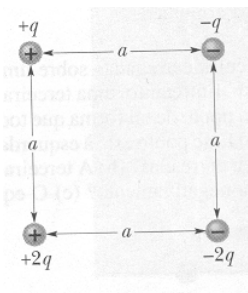


FIG. 22.17

8P- Na Fig.22.18, três partículas carregadas estão localizadas em uma linha reta e estão separadas por distâncias  $d$ . As cargas  $q_1$  e  $q_2$  são mantidas fixas. A carga  $q_3$  está livre para se mover, porém está em equilíbrio (a força eletrostática atuando sobre ela é nula<sup>1</sup>). Encontre  $q_1$  em termos de  $q_2$ ?

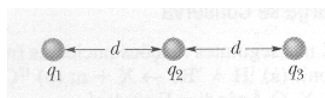


FIG. 22.18

9P - Duas partículas *livres* (isto é, livres para se moverem) com cargas  $+q$  e  $+4q$  estão separadas por uma distância  $L$ . Uma terceira carga é colocada de modo que o sistema todo esteja em equilíbrio. (a) Encontre a localização, a intensidade e o sinal da terceira carga. (b) Mostre que o equilíbrio é instável.

### Seção 22.5 – A carga é quantizada

18E - Qual a intensidade da força eletrostática entre um íon de sódio monovalente ( $\text{Na}^+$ , com carga  $+e$ ) e um íon de cloro monovalente ( $\text{Cl}^-$  com carga  $-e$ ) adjacente, em um cristal de sal, se a separação entre eles é de  $2,82 \times 10^{-10} \text{ m}$ ?

19E - Qual é a carga total em coulombs de 75,0 kg de elétrons?

21E - A intensidade da força eletrostática entre dois íons idênticos que estão separados por uma distância de  $5 \times 10^{-10} \text{ m}$  é  $3,7 \times 10^{-9} \text{ N}$  (a) Qual a carga de cada íon? (b) Quantos elétrons estão “faltando” em cada íon (causando assim o desequilíbrio de carga do íon)?

<sup>1</sup> O que, pela primeira lei de Newton, garante que ela permanecerá em repouso se antes estava em repouso.

22E - Duas gotas d'água esféricas minúscula, com cargas idênticas de  $-1,00 \times 10^{-16} \text{ C}$ , possuem uma separação de 1,00 cm de centro a centro. (a) Qual a intensidade da força eletrostática que atua entre elas? (b) Quantos elétrons em excesso existem sobre cada gota, dando a ela este desequilíbrio de carga?

## Capítulo 23: CAMPOS ELÉTRICOS

---

Uma maneira de explicar a força eletrostática entre duas cargas é supor que cada carga cria um campo elétrico no espaço ao seu redor. A força eletrostática que atua sobre qualquer carga deve-se então ao campo elétrico criado na posição pela outra carga.

**Definição de Campo Elétrico** O campo elétrico  $\vec{E}$  em qualquer ponto é definido em termos da força eletrostática,  $\vec{F}$  que seria exercida sobre uma carga de teste positiva  $q_0$  ali colocada:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (23.1)$$

**Linhas de Campo Elétrico** fornecem uma forma de visualização da direção e da intensidade de campos elétricos. O vetor campo elétrico em qualquer ponto é tangente a uma linha de campo que passa por esse ponto. A densidade de linhas de campo em qualquer região é proporcional à intensidade do campo elétrico nessa região. Linhas de campo se originam em cargas positivas e terminam em cargas negativas.

**Campo devido a uma carga pontual** A intensidade do campo elétrico  $\vec{E}$  criado por uma carga pontual  $q$  a uma distância  $r$  da carga é

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2}. \quad (23.3)$$

A direção é radial a partir da carga.  $\vec{E}$  possui o sentido que se afasta da carga pontual se a carga for positiva e que se aproxima da carga pontual se a carga for negativa.

**Campo devido a um Dipolo Elétrico** Um *dipolo elétrico* é formado por duas partículas de mesma intensidade  $q$ , mas com sinais contrários, separadas por uma pequena distância  $d$ . O seu **momento de dipolo**  $\vec{p}$  possui módulo  $qd$  e aponta da carga negativa para a carga positiva. A intensidade do

campo elétrico criado pelo dipolo em um ponto distante situado sobre o eixo do dipolo (que passa por ambas as cargas) é

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}, \quad (23.9)$$

Onde  $z$  é a distância entre o ponto e o centro do dipolo.

***Campo devido a uma Distribuição Contínua de Cargas*** o campo elétrico devido a uma *distribuição contínua de cargas* é determinado tratando elementos de carga como cargas pontuais e depois somando, por meio de integração, os vetores de campo elétrico produzidos por todos os elementos de carga.

***Força sobre uma Carga Pontual em um Campo Elétrico*** Quando uma carga pontual  $q$  é colocada em um campo elétrico  $\vec{E}$  criado por outras cargas, a força eletrostática  $\vec{F}$  que atua sobre a carga pontual é

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (23.28)$$

A força  $\vec{F}$  possui a mesma direção e o mesmo sentido de  $\vec{E}$  se  $q$  for positiva e a mesma direção e sentido contrário se  $q$  for negativa.

***Dipolo em um Campo Elétrico*** Quando um dipolo elétrico com um momento de dipolo  $\vec{p}$  é colocado em um campo elétrico  $\vec{E}$ , o campo exerce um torque  $\vec{\tau}$  sobre o dipolo:

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (23.34)$$

O dipolo possui uma energia potencial  $U$  associada a uma orientação no campo:

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E} \quad (23.38)$$

Esta energia potencial é definida como nula quando  $\vec{p}$  é perpendicular a  $\vec{E}$ ; ela é mínima ( $U = -pE$ ) quando  $\vec{p}$  está alinhado com  $\vec{E}$  e máxima ( $U = pE$ ) quando  $\vec{p}$  está no sentido contrário ao de  $\vec{E}$ .

## EXERCÍCIOS

### Seção 23.4 – O campo elétrico devido a uma carga pontual

4E - Qual a intensidade de uma carga pontual que criaria um campo elétrico de 1,00 N/C em pontos afastados de 1,00m?

6E - Duas partículas de mesma intensidade de carga  $2,0 \times 10^{-7} \text{ C}$ , mas de sinais contrários, são mantidas a 15 cm uma da outra. Quais a intensidade, a direção e o sentido de  $\vec{E}$  no ponto localizado no ponto médio entre as cargas?

9P - Duas cargas pontuais  $q_1 = 2,1 \times 10^{-8} \text{ C}$  e  $q_2 = -4,0 q_1$ , são fixadas com uma separação de 50 cm. Encontre o ponto ao longo da linha reta que passa pelas duas cargas no qual o campo elétrico se anula.

11P - Na Fig.23.28, qual a intensidade do campo elétrico no ponto  $P$  devida às quatro cargas pontuais mostradas?

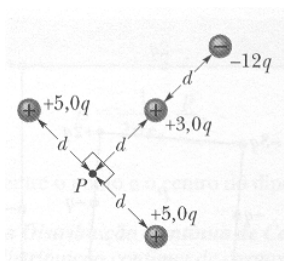


FIG.23.28

12P - Calcule a direção, o sentido e a intensidade do campo elétrico no ponto  $P$  da Fig. 23.29 devidos às três cargas pontuais.

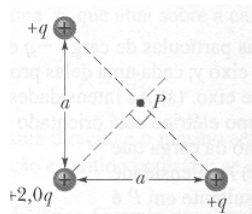


FIG. 23.29

13P - Quais a intensidade, a direção e o sentido do campo elétrico no centro do quadrado da Fig.23.30 se  $q = 1,0 \times 10^{-8} \text{ C}$  e  $a = 5,0 \text{ cm}$ ?

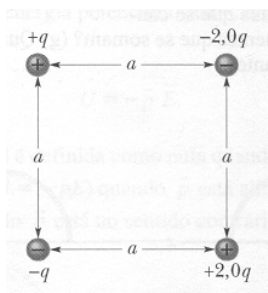


FIG. 23.30

### Seção 23.5 – O campo elétrico devido a um dipolo elétrico

14E - Na Fig. 23.8, considere que as duas cargas são positivas. Supondo que  $z \gg d$ , mostre que  $E$  no ponto  $P$  nessa figura é então dado por

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q}{z^2}.$$

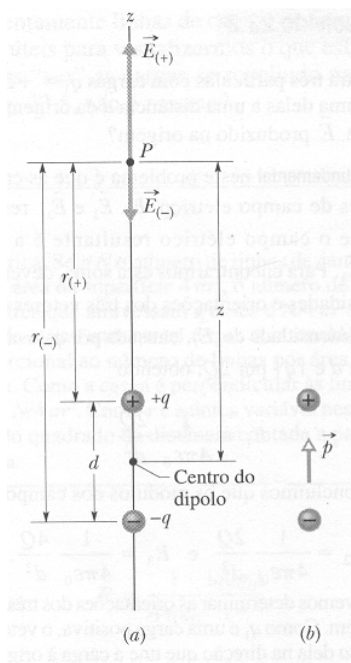


FIG. 23.8

15E - Calcule o momento de dipolo elétrico de um elétron e um próton distantes 4,30 nm um do outro.

16P - Determine a intensidade, a direção e o sentido do campo elétrico no ponto  $P$  devidos ao dipolo elétrico da Fig. 23.31.  $P$  está localizado a uma distância  $r \gg d$  ao longo da bissetriz perpendicular à linha que une as cargas. Expresse a sua resposta em termos da intensidade, da direção e o sentido do momento de dipolo elétrico  $\vec{p}$ .

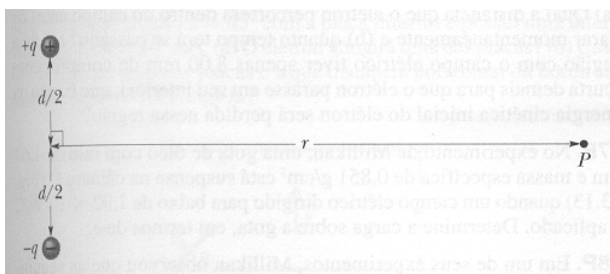


FIG. 23.31

### Seção 23.8 – Uma carga pontual em um campo elétrico

29E - Um elétron é solto do repouso em um campo elétrico uniforme de intensidade igual a  $2,00 \times 10^4 \text{ N/C}$ . Calcule a aceleração do elétron. (*ignore a força da gravidade.*)

33E - Um sistema de nuvens carregadas produz um campo magnético no ar próximo à superfície da Terra. Uma partícula com carga de  $-2,0 \times 10^{-9} \text{ C}$  sofre a ação de uma força eletrostática de  $3,0 \times 10^{-6} \text{ N}$  para baixo quando colocada neste campo. (a) Qual a intensidade do campo elétrico? (b) Qual a intensidade, a direção e o sentido da força eletrostática exercida sobre um próton colocado neste campo? (c) Qual a força gravitacional que age sobre o próton? (d) Qual a razão entre a intensidade da força eletrostática e a intensidade da força gravitacional neste caso?

36E - Um elétron com uma velocidade de  $5,00 \times 10^8 \text{ cm/s}$  penetra em um campo elétrico de intensidade  $1,00 \times 10^3 \text{ N/C}$ , movendo-se paralelamente às linhas de campo, no sentido que retarda o seu movimento (a) Qual a distância que o elétron percorrerá dentro do campo antes de parar momentaneamente e (b) quanto tempo terá se passado? (c) se a região com o campo elétrico tiver apenas 8 mm de comprimento (curta demais para que o elétron parasse em seu interior), qual fração da energia elétrica inicial do elétron será perdida nessa região?

## Capítulo 24: LEI DE GAUSS

---

A *Lei de Gauss* e a lei de Coulomb, apesar de serem expressas de formas diferentes, são maneiras equivalentes de descrever a relação entre carga e campo elétrico em situações estáticas. A lei de Gauss é

$$\epsilon_0 \Phi = q_{\text{env}} \quad (\text{lei de Gauss}), \quad (24.6)$$

onde  $q_{\text{env}}$  é a carga resultante no interior de uma superfície fechada imaginária (uma **superfície gaussiana**) e  $\Phi$  é o **fluxo** resultante do campo elétrico através da superfície:

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (\text{fluxo elétrico através de uma superfície gaussiana}). \quad (24.4)$$

A lei de Coulomb pode ser facilmente deduzida a partir da lei de Gauss.



**Aplicações da Lei de Gauss** Usando a lei de Gauss e, em alguns casos, considerações de simetria, podemos deduzir vários resultados importantes em situações eletrostáticas. Entre estas estão:

1. Uma carga em excesso em um *condutor* está localizada inteiramente sobre a superfície externa do condutor.
2. O campo elétrico externo próximo à *superfície de um condutor carregado* é perpendicular à superfície e possui intensidade

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \text{ (superfície condutora)}. \quad (24.11)$$

No interior do condutor,  $E = 0$ .

3. O campo elétrico em qualquer ponto, devido a uma *linha de carga* infinita com densidade linear de carga uniforme  $\lambda$ , é perpendicular à linha de carga e possui intensidade

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \text{ (linha de carga)}, \quad (24.12)$$

onde  $r$  é a distância perpendicular da linha de carga até o ponto.

4. O campo elétrico, devido a uma *placa não condutora infinita* com densidade superficial de carga uniforme  $\sigma$ , é perpendicular ao plano da placa e possui intensidade

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \text{ (linha de carga)}. \quad (24.13)$$

5. O campo elétrico *fora de uma casca esférica de carga* com raio  $R$  e carga total  $q$  possui direção radial e intensidade dada por

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \text{ (casca esférica, para } r \geq R). \quad (24.15)$$

Nesta equação,  $r$  é a distância do centro da casca até o ponto onde  $E$  é médio. (A carga se comporta, para pontos externos, como se estivesse toda localizada no centro da esfera.) O campo *no interior* de uma casca esférica uniforme de carga é exatamente nulo:

$$E = 0 \text{ (casca esférica, para } r < R). \quad (24.16)$$

6. O campo elétrico *no interior de uma esfera uniforme de carga* possui direção radial e intensidade igual a

$$E = \left( \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^3} \right) r. \quad (24.20)$$

## EXERCÍCIOS

### Seção 24.3 – Fluxo de um campo elétrico

2E - A superfície quadrada mostrada na Fig. 24.25 mede 3,2 mm em cada lado. Ela está imersa em um campo elétrico uniforme com intensidade  $E = 1800 \text{ N/C}$ . As linhas de campo fazem um ângulo de  $35^\circ$  com uma normal à superfície, como mostrado. Tome essa normal como a direção “que aponta para fora”, como se superfície fosse uma das faces de uma caixa. Calcule o fluxo elétrico através da superfície.

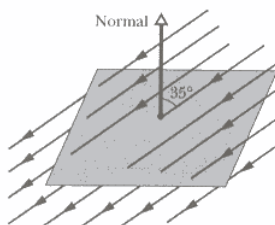


FIG. 24.25

5E - Uma carga pontual de  $1,8 \mu\text{C}$  está no centro de uma superfície gaussiana cúbica com arestas de 55 cm. Qual o fluxo elétrico resultante através da superfície?

## Capítulo 25: POTENCIAL ELÉTRICO

**Energia Potencial Elétrica** A variação  $\Delta U$  da energia potencial elétrica  $U$  de uma carga pontual quando a carga se movimenta de um ponto inicial  $i$  para um ponto final  $f$  em um campo elétrico é

$$\Delta U = U_f - U_i = -W, \quad (25.1)$$

Onde  $W$  é o trabalho realizado pela força eletrostática (devida ao campo elétrico) sobre a carga pontual durante o movimento de  $i$  para  $f$ . Se a energia potencial for definida como nula no infinito, a **energia potencial elétrica**  $U$  da carga pontual em um ponto particular é

$$U = -W_\infty. \quad (25.2)$$

Nesta equação,  $W_\infty$  é o trabalho realizado pela força eletrostática sobre a carga pontual quando a carga é deslocada do infinito até o ponto particular.

**Diferença de Potencial Elétrico e Potencial Elétrico** Definimos a **diferença de potencial**  $\Delta V$  entre dois pontos  $i$  e  $f$  em um campo elétrico como

$$\Delta V = V_f - V_i = \frac{W}{q}, \quad (25.7)$$

onde  $q$  é carga de uma partícula sobre a qual o campo realiza trabalho. O **potencial** em um ponto é

$$V = -\frac{W_\infty}{q}. \quad (25.8)$$

A unidade SI para o potencial é o volt: 1 volt = 1 joule por coulomb.

O potencial e a diferença de potencial também podem ser escritos em termos da energia potencial elétrica  $U$  de uma partícula de carga  $q$  em um campo elétrico:

$$V = \frac{U}{q}, \quad (25.5 \text{ e } 25.6)$$

$$\Delta V = V_f - V_i = \frac{U_f}{q} - \frac{U_i}{q} = \frac{\Delta U}{q}.$$

**Superfícies Equipotenciais** Todos os pontos sobre uma **superfície equipotencial** possuem o mesmo potencial elétrico. O Trabalho realizado sobre uma carga de teste ao movê-la de uma superfície como esta para uma outra independe da localização dos pontos inicial e final sobre estas superfícies e da trajetória que liga os pontos. O campo elétrico  $\vec{E}$  está sempre orientado perpendicularmente às superfícies equipotenciais correspondentes.

**Determinando  $V$  a partir de  $\vec{E}$**  A diferença de potencial elétrico entre dois pontos  $i$  e  $f$  é

$$V_f - V_i = -\int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}, \quad (25.18)$$

Onde a integral é calculada sobre qualquer trajetória que ligue os pontos. Se escolhermos  $V_i = 0$  temos, para o potencial em um ponto particular,

$$V = -\int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}. \quad (25.19)$$

**Potencial devido a Cargas Pontuais** O potencial elétrico devido a uma única carga pontual a uma distância  $r$  dessa carga pontual é

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}, \quad (25.26)$$

$V$  possui o mesmo sinal de  $q$ . O potencial devido a um conjunto de cargas pontuais é

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}. \quad (25.27)$$

**Potencial devido a um Dipolo Elétrico** A uma distância  $r$  de um dipolo elétrico com uma intensidade do momento de dipolo  $p = qd$ , o potencial elétrico do dipolo é

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2}, \quad (25.30)$$

para  $r \gg d$ ; o ângulo  $\theta$  é definido na Fig. 25.11.

**Potencial devido a uma Distribuição Contínua de Cargas** Para uma distribuição contínua de cargas, a Eq. 25.27 se torna

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}, \quad (25.32)$$

onde a integral é calculada sobre toda a distribuição.

**Calculando  $\vec{E}$  a partir de  $V$**  A componente de  $\vec{E}$  em qualquer direção é igual a menos a taxa de variação do potencial com a distância nessa direção:

$$E_s = -\frac{\partial V}{\partial s}. \quad (25.40)$$

As componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  de  $\vec{E}$  podem ser encontradas a partir de

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}. \quad (25.41)$$

Quando  $\vec{E}$  é uniforme, a Eq. 25.40 se reduz a

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta s}, \quad (25.42)$$

Onde  $s$  é perpendicular às superfícies equipotenciais. O campo elétrico é nulo na direção paralela a uma superfície equipotencial.

**Energia Potencial Elétrica de um Sistema de Cargas Pontuais** A energia potencial elétrica de um sistema de cargas pontuais é igual ao trabalho necessário para reunir o sistema com as cargas inicialmente em repouso e infinitamente distantes umas das outras. Para duas cargas com uma separação  $r$ ,

$$U = W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}. \quad (25.43)$$

**Potencial de um Condutor Carregado** uma carga em excesso colocada sobre um condutor irá se localizar, no estado de equilíbrio, inteiramente sobre a superfície externa do condutor. A

carga se distribuirá de modo que todo o condutor, incluindo seus pontos interiores, esteja com um potencial uniforme.

## EXERCÍCIOS:

### Seção 25.2 – Potencial Elétrico

1E - Uma certa bateria de automóvel de 12V pode enviar uma carga total de  $84 \cdot h$  (ampéres-hora) através de um circuito, de um terminal ao outro. (a) Quantos coulombs de carga isso representa? (Dica: Veja a Eq.22.3) (b) Se toda esta carga estiver sujeita a uma diferença de potencial de 12v, qual a energia envolvida?

$$dq = i dt \quad (\text{Eq. 22.3})$$

2E - A diferença de potencial elétrico entre o solo e uma determinada tempestade é de  $1,2 \times 10^9 V$ . Qual a intensidade da variação da energia potencial elétrica (em múltiplos do elétron-volt) de um elétron que se move entre o solo e a nuvem?

### Seção 25.4 – Calculando o potencial a partir do campo

4E - Quando um elétron se move de A para B ao longo de uma linha de campo elétrico na Fig. 25.29, o campo elétrico realiza sobre ele  $3,94 \times 10^{-19} J$  trabalho. Quais as diferenças de potencial elétrico (a)  $V_B - V_A$ , (b)  $V_C - V_A$  e (c)  $V_C - V_B$ ?

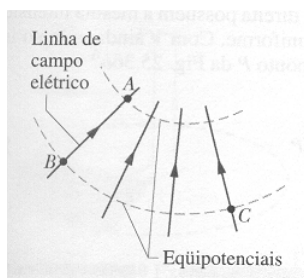


FIG. 25.29

### Seção 25.6 – Potencial devido a um campo de cargas pontuais

13E - Considere uma carga pontual  $q = 1,0 \mu C$ , um ponto A a uma distância  $d_1 = 2,0 m$  de  $q$  e um ponto B a uma distância  $d_2 = 1,0 m$ . (a) Se estes pontos estiverem diametralmente opostos um do outro, como na Fig. 25.31a, qual a diferença de potencial elétrico  $V_A - V_B$ ? (b) Qual será essa diferença de potencial elétrico se os pontos A e B estiverem localizados como na Fig. 25.31b?

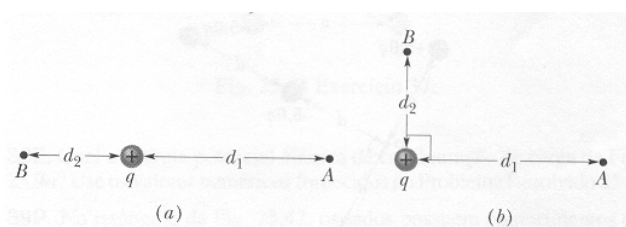


FIG. 25.31

15E - Na Fig. 25.32, considere  $V = 0$  no infinito e que as partículas tenham cargas  $q_1 = +q$  e  $q_2 = -3q$ . Localize então (em termos da distância de separação  $d$ ) um ponto qualquer sobre o eixo  $x$  (que não esteja no infinito) no qual o potencial resultante devido às duas partículas seja nulo.

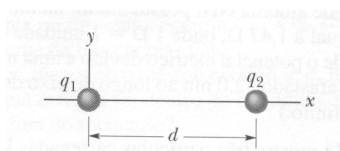


FIG. 25.32

### Seção 25.10 – Energia Pontual elétrica de um sistema de cargas pontuais

37E - Deduza uma expressão para o trabalho exigido para estabelecermos a configuração de quatro cargas da Fig. 25.41, supondo que as cargas estejam inicialmente separadas por uma distância infinita.

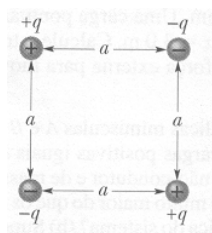


FIG. 25.41

43P - Uma partícula de carga  $q$  está fixa no ponto  $P$  e uma segunda partícula de massa  $m$  e mesma carga  $q$  é mantida inicialmente a uma distância  $r_1$  de  $P$ . A segunda partícula é então solta. Determine sua velocidade quando ela estiver a uma distância  $r_2$  de  $P$ . Considere  $q = 3,1\mu\text{C}$ ,  $m = 20\text{mg}$ ,  $r_1 = 0,90\text{mm}$  e  $r_2 = 2,5\text{mm}$ .

45P - Duas esferas metálicas minúsculas  $A$  e  $B$  de massas  $m_A = 5,00\text{g}$  e  $m_B = 10,0\text{g}$  possuem cargas positivas iguais  $q = 5,00\mu\text{C}$ . As esferas estão ligadas por um fio não-condutor e de massa desprezível de comprimento  $a = 100\text{m}$ , que é muito maior do que os raios das esferas. (a) Qual a energia potencial elétrica do sistema? (b) Suponha que você corte o fio. Nesse instante, qual a

aceleração de cada esfera? (c) Muito tempo depois de você ter cortado o fio, qual a velocidade escalar de cada esfera?

### Seção 25.11 – Potencial de um condutor isolado carregado

51E - Qual a carga em excesso sobre uma esfera condutora de raio  $r = 0,15\text{m}$  se o potencial da esfera for de  $1500\text{ V}$  e  $V = 0$  no infinito?

53P - Duas esferas metálicas, cada uma com raio de  $3,0\text{ cm}$ , possuem uma separação de  $2,0\text{ m}$  de centro a centro. Uma delas possui uma carga de  $+1,0 \times 10^{-8}\text{ C}$ ; a outra possui uma carga de  $-3,0 \times 10^{-8}\text{ C}$ . Suponha que a aceleração é grande o suficiente em relação ao tamanho das esferas para nos permitir considerar a carga sobre cada uma delas sendo distribuída uniformemente (as esferas não afetam uma à outra). Com  $V = 0$  no infinito, calcule (a) o potencial no ponto médio entre seus centros e (b) o potencial de cada esfera.

## Capítulo 26: CAPACITÂNCIA

---

**Capacitor; Capacitância** Um **Capacitor** é formado por dois condutores isolados (*as placas*) com cargas iguais e de sinais contrários  $+q$  e  $-q$ . Sua **capacitância**  $C$  é definida a partir de

$$q = CV, \quad (26.1)$$

onde  $V$  é a diferença de potencial entre as placas. A unidade SI de capacitância é o farad ( $1\text{ farad} = 1\text{ F} = 1\text{ coulomb por volt}$ ).

**Determinando a Capacitância** Geralmente determinamos a capacitância de uma configuração particular de capacitor (1) supondo que uma carga  $q$  tenha sido colocada sobre as placas, (2) encontrando o campo elétrico  $\vec{E}$  devido a carga, (3) calculando a diferença de potencial  $V$  e (4) calculando  $C$  a partir da Eq.26.1. Alguns resultados específicos são os seguintes:

Um *capacitor de placas paralelas* com placas paralelas planas de área  $A$  e espaçamento entre as placas  $d$  possui capacitância

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}. \quad (26.9)$$

Um *capacitor cilíndrico* (dois longos cilindros coaxiais) de comprimento  $L$  e raios  $a$  e  $b$  possui capacitância

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)}. \quad (26.14)$$

Um *capacitor esférico* com placas esféricas concêntricas de raios  $a$  e  $b$  possui capacitância

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{b-a}. \quad (26.17)$$

Se fizemos  $b \rightarrow \infty$  e  $a = R$  na Eq. 26.17, obtemos a capacitância de uma *esfera isolada* de raio  $R$ :

$$C = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (26.18)$$

**Capacitores em Paralelo e em Série** A *capacitância equivalente*  $C_{eq}$  de combinações de capacitores individuais ligados em **paralelo** e em **série** pode ser determinada a partir de

$$C_{eq} = \sum_{j=1}^n C_j \quad (n \text{ capacitores em paralelo}) \quad (26.19)$$

e

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j} \quad (n \text{ capacitores em série}) \quad (26.20)$$

Capacitâncias equivalentes podem ser usadas para calcular as capacitâncias de combinações série-paralelo mais complicadas.

**Energia Potencial e Densidade de Energia** A **energia potencial elétrica**  $U$  de um capacitor carregado.

$$U = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2, \quad (26.21, 26.22)$$

é igual ao trabalho necessário para carregá-lo. Esta energia pode ser associada ao campo elétrico  $\vec{E}$  do capacitor. Por extensão, podemos associar energia armazenada a um campo elétrico. No vácuo, a **densidade de energia**  $u$ , ou a energia potencial por unidade de volume, no interior de um campo elétrico de intensidade  $E$  é dada por

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2. \quad (26.23)$$



**Capacitância com um Dielétrico** Se o espaço entre as placas de um capacitor for completamente preenchido com um material dielétrico, a capacitância  $C$  aumenta de um fator  $k$ , chamado de **constante dielétrica**, que é característica do material. Em uma região que está completamente preenchida por um dielétrico, todas as equações eletrostáticas contendo  $\epsilon_0$  devem ser modificadas, substituindo-se  $\epsilon_0$  por  $k\epsilon_0$ .

Os efeitos do acréscimo de um dielétrico podem ser compreendidos fisicamente em termos da ação de um campo elétrico sobre os dipolos permanentes ou induzidos na placa espessa dielétrica. O resultado é a formação de cargas induzidas sobre as superfícies do dielétrico, que resulta em um enfraquecimento do campo elétrico no interior do dielétrico para a mesma carga livre sobre as placas.

**Lei de Gauss com um Dielétrico** Quando um dielétrico está presente, a lei de Gauss pode ser generalizada para

$$\epsilon_0 \oint k \vec{E} \cdot d\vec{A} = q. \quad (26.34)$$

Nessa equação,  $q$  é a carga livre; qualquer carga superficial induzida é levada em conta incluindo-se a constante dielétrica  $k$  dentro da integral.

## EXERCÍCIOS

### Seção 26.2 - Capacitância

1E – um eletrômetro é um aparelho usado para medir carga estática – uma carga desconhecida é colocada sobre as placas do capacitor do medidor e a diferença de potencial é medida. Qual a carga mínima que pode ser medida por um eletrômetro com uma capacitância de  $50 \text{ pF}$  e uma sensibilidade de voltagem de  $0,15 \text{ V}$ ?

3E - O capacitor da Fig. 26.24 possui uma capacitância de  $25 \mu\text{F}$  e está inicialmente descarregado. A bateria fornece uma diferença de potencial de  $120 \text{ V}$ . Depois de a chave  $S$  ser fechada, quanta carga passará por ela?

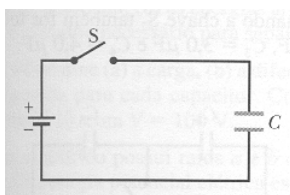


FIG. 26.24

5E - Um capacitor de placas paralelas possui placas circulares de 8,2 cm de raio e 1,3 mm de separação. (a) Calcule a capacitância. (b) Que carga aparecerá sobre as placas se for aplicada uma diferença de potencial de 120V?

#### Seção 26.4 – Capacitores em paralelo e em série

10E – Na Fig. 26.25, determine a capacitância equivalente da combinação. Suponha que  $C_1 = 10,0\mu F$ ,  $C_2 = 5,00\mu F$  e  $C_3 = 4,00\mu F$ .

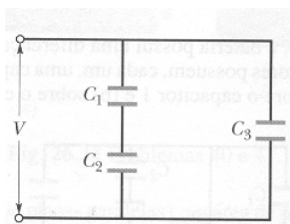


FIG. 26.25

11E – Quantos capacitores de  $1,00\mu F$  devem ser ligados em paralelo para armazenar uma carga de 1,00C com um diferença de potencial de 110V entre as extremidades dos capacitores?

12E – Cada um dos capacitores descarregados da Fig. 26.26 possui uma capacitância de  $25,0\mu F$ . Estabelece-se uma diferença de potencial de 4200V quando a chave é fechada. Quantos coulombs de carga passam então pelo medidor A?

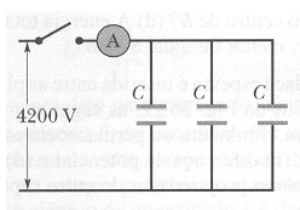


FIG. 26.26

13E – Determine na Fig.26.27 a capacitância equivalente da combinação. Suponha que  $C_1 = 10,0\mu F$ ,  $C_2 = 5,00\mu F$  e  $C_3 = 4,00\mu F$ .

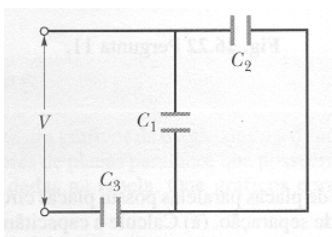


FIG. 26.27

15P – A Fig. 26.28 mostra dois capacitores em série; a seção central de comprimento  $b$  pode ser movida verticalmente. Mostre que a capacitância equivalente desta combinação em série é independente da posição da seção central e é dada por  $C = \epsilon_0 A / (a - b)$ , onde  $A$  é a área da placa.

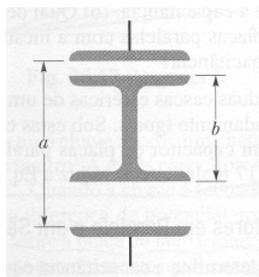


FIG. 26.28

19 P – Na Fig. 26.31, as capacitâncias são  $C_1 = 1,0\mu F$ ,  $C_2 = 3,0\mu F$  e ambos os capacitores estão carregados com uma diferença de potencial de  $V = 100V$ , com polaridade opostas como mostrado. As chaves  $s_1$  e  $s_2$  são agora fechadas. (a) Agora qual a diferença de potencial entre os pontos  $a$  e  $b$ ? Agora quais as cargas sobre os capacitores (b)1 e (c) 2?

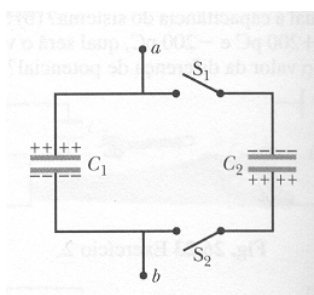


FIG. 26.31

### Seção 26.5 – Energia Armazenada em um campo elétrico

23E – Qual a capacitância necessária para armazenar uma energia de  $kW.h$  com uma diferença de potencial de  $1000V$ ?

25E – Dois capacitores, de  $2,0$  e  $4,0\mu F$  de capacitância, estão ligados em paralelo atravessando uma diferença de potencial de  $300V$ . Calcule a energia total armazenada nos capacitores.

35E – Dado um capacitor de  $7,4pF$  cheio de ar entre as placas, pede-se para convertê-lo em um capacitor que possa armazenar até  $7,4\mu J$  com uma diferença de potencial máxima de  $652V$ . Que dielétrico da Tabela 26.1 dever ser usado para preencher o intervalo no capacitor cheio de ar se não fosse permitida uma margem de erro?

**TABELA 26.1 Algumas Propriedades de Dielétricos\***

Material	Constante de Dielétrico $\kappa$	Rigidez Dielétrica (kV/mm)
ar (1 atm)	1,00054	3
Poliestireno	2,6	24
Papel	3,5	16
Óleo de transformador	4,5	
Pirex	4,7	14
Mica de rubi	5,4	
Porcelana	6,5	
Silício	12	
Germânio	16	
Etanol	25	
Água (20°C)	80,4	
Água (25°C)	78,5	
Cerâmica titânia	130	
Titanato de estrôncio	310	8

Para o vácuo,  $\kappa = \text{unidade}$ .

\*Medidas à temperatura ambiente, exceto para a água.

TABELA 26.1

41P – Um capacitor de placas paralelas com área de placa  $A$  é preenchido com dois dielétricos como na Fig. 26.34b. Mostre que a capacitância é

$$C = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}.$$

Verifique essa fórmula para casos limites. (*Dica:* Você consegue justificar este arranjo como sendo dois capacitores em série?)

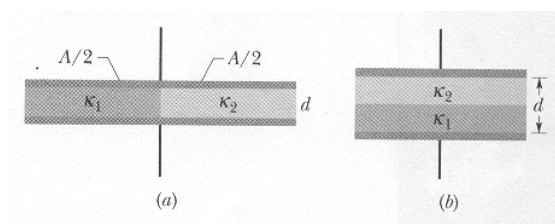


FIG. 26.34

### Seção 26.8 – Dielétricos e a lei de gauss

43E – Um capacitor de placas paralelas possui uma capacitância de  $100\text{ pF}$ , uma área de placa de  $100\text{ cm}^2$  e um dielétrico de mica ( $k = 5,4$ ) que preenche completamente o espaço entre as placas. Com uma diferença de potencial de  $50\text{ V}$ , calcule (a) a intensidade do campo elétrico  $E$  na mica, (b) a intensidade da carga livre sobre as placas e (c) a intensidade da carga superficial induzida sobre a mica.

## Capítulo 27: CORRENTE E RESISTÊNCIA

---

**Corrente** Uma **corrente elétrica**  $i$  em um condutor é definida por

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (27.1)$$

nesta equação,  $dq$  é a quantidade de carga (positiva) que passa no tempo  $dt$  por uma superfície hipotética que atravessa completamente o condutor. Por convenção, o sentido da corrente elétrica é tomado como o sentido no qual portadores de carga positivos se moveriam. A unidade SI de corrente elétrica é o **ampére** (A):  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ .

**Densidade de Corrente** A corrente (um escalar) está relacionada com a **densidade de corrente**  $\vec{J}$  (um vetor) por

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A}, \quad (27.4)$$

onde  $d\vec{A}$  é um vetor perpendicular a um elemento de superfície de área  $dA$ , e a integral é feita sobre qualquer superfície que atravessa completamente o condutor.  $\vec{J}$  possui a mesma direção e sentido do vetor velocidade das cargas em movimento se elas forem positivas e o sentido contrário se elas forem negativas.

**Velocidade de Deriva dos Portadores de Carga** Quando se estabelece um campo elétrico  $\vec{E}$  em um condutor, os portadores de carga (supostos positivos) adquirem uma **velocidade de deriva**  $v_d$  está relacionada com a densidade de corrente por

$$\vec{J} = (ne)\vec{v}_d, \quad (27.7)$$

onde  $ne$  é a densidade de carga do portador.

**Resistência de um condutor** A **resistência**  $R$  de um condutor é definida como

$$R = \frac{V}{i} \text{ (definição de } R\text{)}, \quad (27.8)$$

onde  $V$  é a diferença de potencial entre as extremidades do condutor, e  $i$  é a corrente. A unidade SI de resistência é o **ohm** ( $\Omega$ ):  $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ . Equações análogas definem a **resistividade**  $\rho$  e a **condutividade**  $\sigma$  de um material:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{E}{J} \text{ (definições de } \rho \text{ e } \sigma\text{)} \quad (27.12, 27.10)$$

onde  $E$  é a intensidade do campo elétrico aplicado. A unidade SI de resistividade é o ohm·metro ( $\Omega.m$ ). A Eq. 27.10 corresponde à equação vetorial

$$\vec{E} = \rho \vec{J}. \quad (27.11)$$

A resistência  $R$  de um fio condutor de comprimento  $L$  e seção transversal uniforme é

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (27.16)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal.

**Varição de  $\rho$  com a Temperatura** A resistividade  $\rho$  para maioria dos materiais varia com a temperatura. Para muitos materiais, inclusive os metais, a relação entre  $\rho$  e a temperatura  $T$  é aproximada pela equação

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0). \quad (27.17)$$

Nesta equação,  $T_0$  é uma temperatura de referência  $\rho_0$  é a resistividade à temperatura  $T_0$  e  $\alpha$  é coeficiente de resistividade de temperatura para o material.

**Lei de Ohm** Um dado dispositivo (condutor, resistor, ou qualquer outro dispositivo elétrico) obedecerá à *lei de Ohm* se a sua resistência  $R$ , definida Eq. 27.8 como  $V/i$ , for independente da diferença de potencial  $V$  aplicada. Um dado *material* obedecerá à lei de Ohm se a sua resistividade, definida pela 27.10, for independente da intensidade, da direção e sentido do campo elétrico aplicado  $\vec{E}$ .

**Resistividade de um Metal** Supondo que os elétrons de condução em um metal estão livres para se moverem como as moléculas de um gás, é possível deduzir um expressão para a resistividade de um metal:

$$\rho = \frac{m}{e^2 n \tau}. \quad (27.20)$$

Nesta equação,  $n$  é o número de elétrons livres por unidade de volume, e  $\tau$  é o tempo médio entre as colisões de um elétron com os átomos do metal. Podemos explicar por que metais obedecem à lei de Ohm, chamando a atenção para o fato de que  $\tau$  é essencialmente independente da intensidade  $E$  de qualquer campo elétrico aplicado a um metal.

**Potência** A potência  $P$ , ou taxa de transferência de energia, em um dispositivo elétrico no qual se mantém uma diferença de potencial  $V$  entre as suas extremidades é

$$P = iV \quad (\text{taxa de transferência de energia elétrica}) \quad (27.21)$$

**Dissipação Resistiva** Se o dispositivo for um resistor, podemos escrever a Eq. 27.21 como

$$P = i^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (\text{dissipação resistiva}) \quad (27.22, 27.23)$$

Em um resistor, converte-se energia potencial elétrica em energia térmica interna por meio de colisões entre portadores de carga e átomos.

**Semicondutores** são materiais com poucos elétrons de condução, mas podem se tornar condutores quando são *dopados* com outros átomos que contribuem com elétrons livres.

**Supercondutores** são materiais que perdem toda a resistência elétrica a baixas temperaturas. Pesquisas recentes revelaram materiais que são supercondutores a temperaturas surpreendentemente altas.

## EXERCÍCIOS

### Seção 27.2 – Corrente Elétrica

1E – Existe uma corrente de 5,0 A em um resistor de  $10\Omega$  que dura 4 min. (a) Quantos coulombs e (b) quantos elétrons atravessam qualquer seção transversal do resistor neste intervalo de tempo?

3P – Uma esfera condutora isolada tem um raio de 10cm. Um fio transporta uma corrente de 1,000 002 A para dentro dela. Um outro fio transporta uma corrente de 1,000 0000A para fora dela. Quanto tempo levaria para a esfera aumentar seu potencial em 1000V?

5E – Um feixe contém  $2,0 \times 10^8$  íons positivos carregados duplamente por centímetro cúbico, que estão se movendo todos para o norte com uma velocidade de  $1,0 \times 10^5 \text{ m/s}$ . (a) Qual a intensidade, a direção e o sentido da densidade de corrente  $\vec{j}$ ? (b) É possível calcular a corrente total  $i$  neste feixe de íons? Caso não seja possível, que informações adicionais são necessárias?

7E – Um fusível em um circuito elétrico é um fio que é projetado para derreter, e desse modo abrir o circuito, se a corrente exceder um valor predeterminado. Suponha que o material a ser usado em

um fusível se funda quando a necessidade de corrente atinge  $440\text{ A/cm}^2$ . Que diâmetro de fio cilíndrico deveria ser usado para fazer um fusível que limitará a corrente a  $0,50\text{ A}$ ?

#### Seção 27.4 – Resistência e Resistividade

13E – Um fio condutor possui  $1,0\text{ mm}$  de diâmetro, um comprimento de  $2,0\text{ m}$  e uma resistência de  $50\text{ m}\Omega$ . Qual a resistividade do material?

15E – Um ser humano pode ser eletrocutado se uma pequena corrente de  $50\text{ mA}$  passar perto do seu coração. Um eletricista trabalhando com as mãos suadas faz bom contato com os dois condutores que ele está segurando, um em cada mão. Se a sua resistência for de  $2000\Omega$ , qual poderia ser a voltagem fatal?

19E – Um fio com uma resistência de  $6,0\Omega$  é esticado de tal modo que seu novo comprimento é de três vezes o seu comprimento original. Determine a resistência do fio mais longo, supondo que a resistividade e a densidade do material não tenham se modificado.

21P – Dois condutores são feitos do mesmo material e possuem o mesmo comprimento. O condutor  $A$  é um fio sólido com diâmetro de  $1,0\text{ mm}$ . O condutor  $B$  é um tubo oco com diâmetro externo de  $2,0\text{ mm}$  e diâmetro interno de  $1,0\text{ mm}$ . Qual a razão entre as resistências  $R_A / R_B$ , medidas entre as suas extremidades?

#### Seção 27.7 – Potência em circuitos elétricos

31E – Um certo tubo de raios  $X$  opera a uma corrente de  $7,0\text{ mA}$  e uma diferença de potencial de  $80\text{ kV}$ . Qual a sua potência em watts?

32E – Um estudante deixou seu rádio de  $9,0\text{ V}$  e  $7,0\text{ W}$  ligado a todo volume das 21 horas até às 2 horas do dia seguinte. Quanta carga passou por ele?

33E – Uma diferença de potencial de  $120\text{ V}$  é aplicada a um aquecedor de ambiente cuja resistência é de  $14\Omega$  quando quente. (a) Qual a taxa com que a energia elétrica é transformada em calor? (b) A  $5,0$  centavos/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ , quanto custa operar este dispositivo por 5 horas?



37P – Um aquecedor por irradiação de 1250W é fabricado para operar em 115V. (a) Qual será a corrente no aquecedor? (b) Qual a resistência da bobina de aquecimento? (c) Quanta energia térmica é produzida em 1h pelo aquecedor?

## Capítulo 28: CIRCUITOS

---

**Fem** Um **dispositivo de fem** realiza trabalho sobre cargas para manter uma diferença de potencial entre os seus terminais de saída. Se  $dW$  é o trabalho que o dispositivo realiza para forçar uma carga positiva  $dq$  do terminal negativo para o terminal positivo, então a **fem** (trabalho por unidade de carga) do dispositivo é

$$\mathcal{E} = \frac{dW}{dq} \text{ (definição de } \mathcal{E} \text{ )}. \quad (28.1)$$

O volt é a unidade SI tanto de *fem* quanto de diferença de potencial. Um **dispositivo de fem ideal** é um dispositivo desprovidos de qualquer resistência interna. A diferença de potencial entre os seus terminais é igual à fem. Um **dispositivo de fem real** possui resistência interna. A diferença de potencial entre os seus terminais serão igual à fem somente se não houver corrente passando pelo dispositivo.

**Analisando Circuitos** A variação do potencial ao atravessamos uma resistência  $R$  no sentido da corrente é  $-iR$ ; no sentido contrário é  $+iR$ . A variação do potencial ao atravessamos um dispositivo de fem ideal no sentido da seta da fem é  $+\mathcal{E}$ ; no sentido contrário é  $-\mathcal{E}$ . A conservação da energia leva à regra das malhas:

**Regra das Malhas.** *A soma algébrica das variações do potencial encontradas em uma travessia completa de qualquer malha de um circuito tem que ser nula.*

A conservação da carga nos fornece a regra dos nós.

**Regra dos nós** A soma das correntes afluentes a qualquer nó tem que ser igual à soma das correntes afluentes desse nó.

**Circuitos de Malha Única** A corrente em um circuito de malha única contendo uma única resistência  $R$  e um dispositivo de fem com fem  $\mathcal{E}$  e resistência interna  $r$  é

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (28.4)$$

que se reduz a  $i = \mathcal{E} / R$  para um dispositivo de fem ideal com  $r = 0$ .

**Potência** Quando uma bateria real de fem  $\mathcal{E}$  e resistência interna  $r$  realiza trabalho sobre os portadores de carga em uma corrente  $i$  que passam por ela, a taxa temporal  $P$  de transferência de energia para os portadores de carga é igual a

$$P = iV, \quad (28.11)$$

onde  $V$  é o potencial entre os terminais da bateria. A taxa  $P_r$  de transferência de energia para energia térmica no interior da bateria é

$$P_r = i^2 r. \quad (28.13)$$

A taxa  $P_{fem}$  com que a energia química no interior da bateria varia é

$$P_{fem} = i\mathcal{E} \quad (28.14)$$

**Resistências em Série** Quando as resistências estão **em série**, elas possuem a mesma corrente. A resistência equivalente que pode substituir uma combinação em série de resistência é

$$R_{eq} = \sum_{j=1}^n R_j \quad (n \text{ resistências em série}) \quad (28.7)$$

**Resistências em Paralelo** Quando as resistências estão **em paralelo**, elas possuem a mesma diferença de potencial. A resistência equivalente que pode substituir uma combinação de resistências em paralelo é dada por

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} \quad (n \text{ resistências em paralelo}). \quad (28.21)$$

**Circuitos RC** Quando uma fem  $\mathcal{E}$  é aplicada a uma resistência  $R$  e uma capacitância  $C$  em série, como na Fig. 28.13 com a chave em  $a$ , a carga no capacitor aumenta de acordo com

$$q = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}) \quad (\text{carregando um capacitor}), \quad (28.30)$$

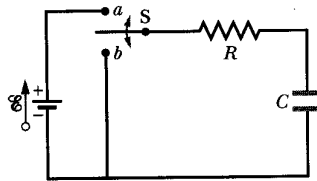


Fig. 28.13

na qual  $C\mathcal{E} = q_0$  é a carga (final) de equilíbrio e  $RC = \tau$  é a **constante de tempo capacitava** do circuito. Durante o carregamento, a corrente é

$$i = \frac{dq}{dt} = \left( \frac{\mathcal{E}}{R} \right) e^{-t/RC} \quad (\text{carregando um capacitor}). \quad (28.31)$$

Quando um capacitor descarrega através de uma resistência  $R$ , a carga no capacitor decai de acordo com

$$q = q_0 e^{-t/RC} \quad (\text{descarregando um capacitor}). \quad (28.31)$$

Durante a descarga, a corrente é

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{q_0}{RC} e^{-t/RC} \quad (\text{descarregando um capacitor}) \quad (28.37)$$

## EXERCÍCIOS

### Seção 28.5 – Diferenças de potencial

1E – Uma pilha padrão de lanterna pode fornecer cerca de  $2,0\text{W}\cdot\text{h}$  de energia antes que ela se esgote. (a) Se uma pilha custa 80 centavos de dólar, qual o custo de operação de uma lâmpada de 100W por 8,0h usando pilhas? (b) Qual o custo se a energia for fornecida a 6 centavos de dólar por quilowatt·hora?

2E – Uma corrente de 5,0A é mantida em um circuito por 6,0 min por meio de uma bateria recarregável com uma fem de 6,0V. Qual a redução de energia química da bateria?

4E – Na Fig. 28.22,  $\mathcal{E}_1 = 12\text{V}$  e  $\mathcal{E}_2 = 8\text{V}$ . (a) Qual o sentido da corrente no resistor? (b) Que bateria está realizando trabalho positivo? (c) Qual o ponto, A ou B, está no potencial mais alto?

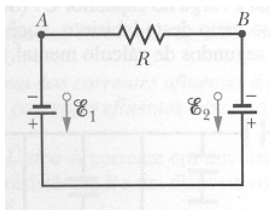


FIG. 28.22

5E – Suponha que as baterias da Fig.28.23 tenham resistências internas desprezíveis. Determine (a) a corrente no circuito, (b) a potência dissipada em cada resistor e (c) a potência de cada bateria, indicando se a energia é fornecida ou absorvida por cada bateria.

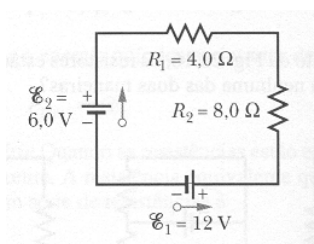


FIG. 28.23

9E – Na Fig. 28.24, o segmento  $AB$  do circuito absorve energia a uma taxa de  $50\text{W}$  quando uma corrente  $i = 1,0\text{A}$  passa por ele no sentido indicado. (a) Qual a diferença de potencial entre  $A$  e  $B$ ? (b) o dispositivo de fem  $X$  não possui resistência interna. Qual a sua fem? (c) Qual a sua *polaridade* (a orientação dos seus terminais positivo e negativo)?

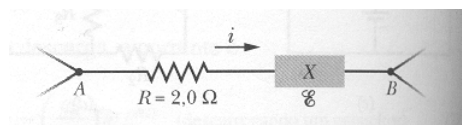


FIG. 28.24

### Seção 28.6 – Circuitos de múltiplas malhas

21E – Determine na Fig. 28.28 a corrente em cada resistor e a diferença de potencial entre os pontos  $a$  e  $b$ . Considere  $\mathcal{E}_1 = 6,0\text{V}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 5,0\text{V}$ ,  $\mathcal{E}_3 = 4,0\text{V}$ ,  $R_1 = 100\Omega$  e  $R_2 = 50\Omega$ .

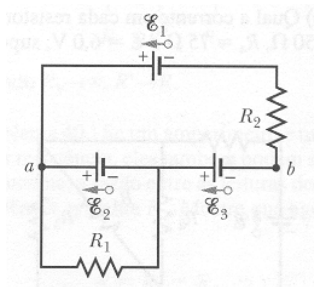


FIG. 28.28

23E – Duas lâmpadas, uma com resistências  $R_1$  e a outra com resistência  $R_2$ , onde  $R_1 > R_2$ , estão ligadas a uma bateria (a) em paralelo e (b) em série. Qual lâmpada possui maior brilho (dissipa mais energia) em cada caso?

25E – Nove fios de cobre de comprimento  $\ell$  e diâmetro  $d$  estão ligados em paralelo para formar um único condutor composto de resistência  $R$ . Qual deve ser diâmetro  $D$  de um fio único de cobre de comprimento  $\ell$  para que ele possua a mesma resistência?

28P – (a) Na Fig. 28.31, qual a resistência equivalente da rede de resistores mostrada? (b) Qual a corrente em cada resistor? Considere  $R_1 = 100\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 50\Omega$ ,  $R_4 = 75\Omega$  e  $\mathcal{E} = 6,0V$ ; suponha que a bateria é ideal.

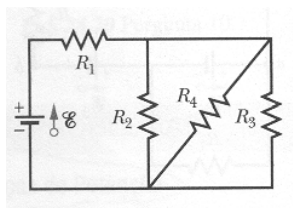


FIG.28.31

33P – (a) Calcule a corrente que atravessa cada bateria ideal da Fig. 28.35. Suponha que  $R_1 = 1,0\Omega$  e  $R_2 = 2,0\Omega$ ,  $\mathcal{E}_1 = 2,0V$  e  $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3 = 4,0V$ . (b) Calcule  $V_a - V_b$ .

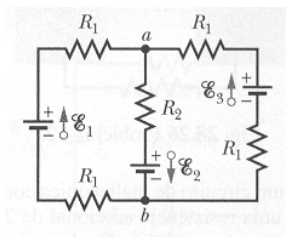


FIG. 28.35

### Seção 28.8 – Circuitos RC

45E – Quantas constantes de tempo devem ser passar para que um capacitor inicialmente descarregado em um circuito em série RC seja carregado até 99,0% da sua carga de equilíbrio?

51P – Um capacitor com uma diferença de potencial inicial de 100V é descarregado através de um resistor quando um chave entre eles é fechada em  $t = 0$ . Em  $t = 10,0s$ , a diferença de potencial entre as placas do capacitor é de 1,00V. (a) Qual a constante de tempo do circuito? (b) Qual a diferença de potencial entre as placas do capacitor em  $t = 17,0s$ ?

53P – Um capacitor de  $1,0\mu F$  com uma energia armazenada inicialmente de 0,50J é descarregado através de um resistor de  $1,0M\Omega$ . (a) Qual a carga inicial no capacitor? (b) Qual a corrente que atravessa o resistor quando começa a descarga? (c) Determine  $V_C$ , a diferença de potencial entre as placas do capacitor, e  $V_R$ , a diferença de potencial entre as extremidades do resistor, em função do tempo. (d) Expresse a taxa de produção de energia térmica no resistor em função do tempo.

## Capítulo 29: CAMPOS MAGNÉTICOS

---

**Campo Magnético**  $\vec{B}$  um **campo magnético**  $\vec{B}$  é definido em termos de força  $\vec{F}_B$  que age sobre uma partícula de teste com carga  $q$  que se move através do campo com velocidade  $\vec{v}$ :

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (29.2)$$

A unidade SI para  $\vec{B}$  é o tesla (T):  $1T = 1N(A \cdot m) = 10^4 \text{ gauss}$ .

**O Efeito Hall** Quando uma tira condutora de espessura  $\ell$  transportando uma corrente  $i$  é colocada em um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , alguns portadores de carga (com carga  $e$ ) se acumulam sobre os lados do condutor, criando uma diferença de potencial na largura da tira. As polaridades dos lados indicam o sinal dos portadores de carga; a densidade numérica  $n$  de portadores de carga pode ser calculada com

$$n = \frac{Bi}{Vle}. \quad (29.12)$$

**Uma partícula Carregada Circulando em um Campo Magnético** Uma partícula carregada com massa  $m$  e intensidade de carga  $q$  se movendo com velocidade  $\vec{v}$  perpendicular a um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  se deslocará em um círculo. Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento circular produz

$$qvB = \frac{mv^2}{r}, \quad (29.15)$$

A partir da qual determinamos o raio  $r$  do círculo como

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (29.16)$$

A frequência de revolução  $f$ , a frequência angular  $\omega$  e o período do movimento  $T$  são dados por

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}. \quad (29.19, 29.18, 29.17)$$

**Ciclotrons e Síndrotons** Um ciclotron é um acelerador de partículas que usa um campo magnético para manter uma partícula carregada em uma órbita circular de raio crescente, de modo que um

modesto potencial de aceleração possa atuar repetidamente sobre a partícula, fornecendo a ela uma alta energia. Como a partícula em movimento fica fora de fase com o oscilador quando sua velocidade se aproxima da velocidade da luz, existe um limite superior para a energia que pode ser atingida com um ciclotron. Um síncroton evita essa dificuldade. Aqui, tanto  $B$  quando a frequência  $f_{\text{osc}}$  do oscilador são programadas para variar ciclicamente de modo que a partícula não apenas possa chegar a altas energias, mas possa também fazê-lo com um raio orbital constante.

**Força Magnética sobre um Fio que Transporta Corrente** Um fio reto transportando uma corrente  $i$  em um campo magnético uniformemente experimenta uma força lateral

$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}. \quad (29.26)$$

A força atuando sobre um elemento de corrente  $i d\vec{L}$  em um campo magnético é

$$d\vec{F}_B = i d\vec{L} \times \vec{B}. \quad (29.28)$$

O sentido do vetor comprimento  $\vec{L}$  ou  $d\vec{L}$  é o mesmo da corrente  $i$ .

**Torque sobre uma Bobina que Transporta Corrente** Uma bobina (de área  $A$  e transportando uma corrente  $i$ , com  $N$  voltas) em um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  experimentará um torque  $\vec{\tau}$  dado por

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}. \quad (29.37)$$

Nesta equação,  $\vec{\mu}$  é **momento de dipolo magnético** da bobina, com intensidade  $\mu = NiA$ , e direção e sentido dados pela regra da mão direita.

**Energia de Orientação de um Dipolo Magnético** A **energia potencial magnética** de um momento de dipolo em um campo magnético é

$$U(\theta) = \vec{\mu} \cdot \vec{B}. \quad (29.38)$$

Se um dipolo magnético gira de uma orientação inicial  $\theta_i$  para uma outra orientação  $\theta_f$ , o trabalho realizado pelo campo magnético sobre o dipolo é

$$W = -\Delta U = -(U_f - U_i) \quad (29.39)$$

## EXERCÍCIOS

### Seção 29.2 – A definição de $\vec{B}$

2E – Um elétron no tubo de uma câmera de TV está se movendo a  $7,20 \times 10^6 \text{ m/s}$  em um campo magnético com intensidade de 83,0mT. (a) Sem conhecer a direção e o sentido do campo, o que se pode dizer a respeito da maior e da menor intensidade da força que atua sobre o elétron devido ao campo? (b) Em um ponto o elétron possui uma aceleração de intensidade igual a  $4,90 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$ . Qual o ângulo entre o vetor velocidade do elétron e o campo magnético?

3E – Um próton viajando numa direção que faz um ângulo de  $23,0^\circ$  em relação à direção de um campo magnético de intensidade igual a 2,60mT experimenta a ação de uma força magnética de  $6,50 \times 10^{-17} \text{ N}$ . Calcule (a) a velocidade escalar do próton e (b) a sua energia cinética em elétrons-volts.

7E – Um elétron com energia cinética de 2,5 keV se move horizontalmente penetrando em uma região do espaço na qual existe um campo elétrico uniforme dirigido para baixo com intensidade de  $10 \text{ kV/m}$ . (a) Qual a intensidade, a direção e o sentido do (menor) campo magnético uniforme que fará com que o elétron continue a se mover horizontalmente? Ignore a força gravitacional, que é consideravelmente menor. (b) É possível que o próton passe através desta combinação de campos sem sofrer deflexão? Em caso positivo, em que circunstâncias?

8E – Um campo elétrico de 1,50 kV/m e em campo magnético de 0,400 T atuam sobre um elétron em movimento sem produzir nenhuma força resultante. (a) Calcule a velocidade mínima  $v$  do elétron. (b) Desenhe os vetores,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ .

10P – Um elétron possui uma velocidade inicial de  $(12,0\hat{j} + 15,0\hat{k}) \text{ km/s}$  e uma aceleração constante de  $(2,00 \times 10^{12} \text{ m/s}^2)\hat{i}$  em uma região na qual estão presentes um campo elétrico e um campo magnético uniformes. Se  $\vec{B} = (400\mu\text{T})\hat{i}$ , determine o campo elétrico  $\vec{E}$ .

### Seção 29.5 – Uma partícula carregada descrevendo um círculo

15E – Que campo magnético uniforme, aplicado perpendicularmente a um feixe de elétrons se movendo a  $1,3 \times 10^6 \text{ m/s}$ , é necessário para fazer com que os elétrons se desloquem em um arco circular de raio igual a 0,35m?



16E – Um elétron é acelerado a partir do repouso por um diferença de potencial de 350V. Depois, ele entra em um campo magnético uniforme de intensidade igual a 200mT com seu vetor velocidade perpendicular ao campo. Calcule (a) a velocidade escalar do elétron e (b) o raio da sua trajetória no campo magnético.

### Seção 29.7 – Força magnética sobre um fio conduzindo corrente

33E – Um condutor horizontal que é parte de uma linha de potência transporta uma corrente de 5000A do sul para o norte. O campo magnético da terra ( $60,0\mu T$ ) está dirigido para o norte e está inclinado para baixo formando um ângulo de  $70^\circ$  com a horizontal. Determine a intensidade, a direção e o sentido da força magnética sobre 100m do condutor em razão do campo magnético da Terra.

34E – Um fio com 1,80m de comprimento transporta uma corrente de 13,0A e faz um ângulo de  $35^\circ$  com um campo magnético uniforme  $B = 1,50T$ . Calcule a força magnética sobre o fio.

### Seção 29.8 – Torque sobre uma espira de corrente

39E – A Fig.29.36 mostra uma bobina retangular de 20 voltas de fio, com dimensões de 10cm por 5,0cm. Ela transporta uma corrente de 0,10A e está articulada ao longo de um lado comprido. Ela é montada no plano  $xy$ , fazendo  $30^\circ$  com a direção de um campo magnético uniforme de intensidade igual a 0,50T. Determine a intensidade, a direção e o sentido do torque que age sobre a bobina em torno da linha de articulação.

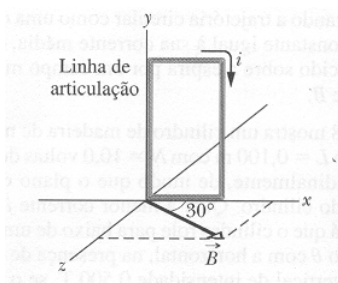


FIG. 29.36

## Capítulo 30: CAMPOS MAGNÉTICOS DEVIDOS A CORRENTE

*A Lei de Biot-Savart* O campo magnético criado por um condutor transportando corrente pode ser determinado a partir da *lei de Biot-Savart*. Esta lei afirma que a contribuição  $d\vec{B}$  para o campo produzida por um elemento de corrente-comprimento  $i d\vec{s}$  em um ponto  $P$ , a uma distância  $r$  do elemento de corrente, é

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{ed\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \text{ (lei de Biot-Savart).} \quad (30.5)$$

Nesta equação,  $\vec{r}$  é um vetor que aponta do elemento para o ponto  $P$ . A grandeza  $\mu_0$ , chamada de constante de permeabilidade, tem o valor  $4\pi \times 10^{-7} T \cdot m / A \approx 1,26 \times 10^{-6} T \cdot m / A$ .

***Campo Magnético de um Fio Reto Longo*** para um fio reto longo transportando uma corrente  $i$ , a lei de Biot-Savart fornece, para a intensidade do campo magnético a uma distância  $R$  perpendicular ao fio,

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \text{ (fio reto longo).} \quad (30.6)$$

***Campo Magnético de um Arco Circular*** A intensidade do campo magnético no centro de um arco circular, de raio  $R$  e ângulo central  $\phi$  (em radianos), transportando uma corrente  $i$ , é

$$B = \frac{\mu_0 i \phi}{4\pi R} \text{ (no centro do arco circular).} \quad (30.11)$$

***Força entre Fios Paralelos Transportando Correntes*** Fios paralelos transportando correntes no mesmo sentido se atraem, enquanto fios paralelos transportando correntes em sentido contrários se repelem. A intensidade da força sobre um comprimento  $L$  de qualquer um dos dois fios é

$$F_{ba} = i_b L B_a \sin 90^\circ = \frac{\mu_0 L i_a i_b}{2\pi d}, \quad (30.15)$$

Onde  $d$  é a separação entre os fios, e  $i_a$  e  $i_b$  são as correntes nos fios.

***Lei de Ampère*** A lei de Ampère afirma que

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{env} \text{ (lei de Ampère)} \quad (30.16)$$

A integral de linha reta nesta equação é calculada ao redor de um laço<sup>2</sup> chamado de *laço de Ampère*. A corrente  $i$  é a corrente *resultante* envolta pelo laço. Para algumas distribuições de corrente, a Eq. 30.16 é mais fácil de ser usada do que a Eq. 30.5 para calcular o campo magnético devido às correntes.

***Campos de um Solenóide e de um Toróide*** No interior de um *solenóide longo* transportando corrente  $i$ , em pontos não próximos das suas extremidades, a intensidade  $B$  do campo magnético é

$$B = \mu_0 i n \quad (\text{solenóide ideal}). \quad (30.25)$$

Onde  $n$  é o número de voltas por unidade de comprimento. Em um ponto no interior de um *toróide*, a intensidade  $B$  do campo magnético é

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi r} \quad (\text{toróide}), \quad (30.26)$$

onde  $r$  é a distância do centro do toróide até o ponto.

***Campo de um Dipolo Magnético*** O campo magnético produzido por uma bobina transportando corrente, que é um *dipolo magnético*, em um ponto  $P$  localizado a uma distância  $z$  ao longo do eixo central da bobina é paralelo ao eixo e é dado por

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\vec{u}}{z^3}, \quad (30.29)$$

Onde  $\vec{u}$  é o momento de dipolo da bobina. Esta equação se aplica apenas quando  $z$  é muito maior do que as dimensões da bobina.

## EXERCÍCIOS

### Seção 30.1 – Calculando o campo magnético devido a uma corrente

1E – Um topógrafo está usando uma bússola magnética 6,1m abaixo de uma linha de transmissão, na qual há uma corrente estacionária de 100A. (a) Qual o campo magnético no local onde está a bússola devido à linha de transmissão? (b) Isto irá interferir seriamente com a leitura da bússola? A componente horizontal do campo magnético da Terra no local é igual a  $20\mu T$ .

<sup>2</sup> Ou seja, uma curva fechada envolvendo correntes (N.T.)

3E – Em um certo local na Filipinas, o campo magnético da Terra de  $39\mu T$  é horizontal e está voltado para o norte. Suponha que o campo resultante seja nulo e exatamente 8,0cm acima de um fio horizontal reto e longo que transporta uma corrente constante. Qual (a) a intensidade e (b) o sentido da corrente?

8P – Use a lei de Biot-Savart para calcular o campo magnético  $\theta$  em C, o centro comum dos arcos semicirculares  $AD$  e  $HJ$  na Fig.30.33a. Os dois arcos, de raios  $R_2$  e  $R_1$ , respectivamente, formam parte do circuito  $ADJHA$  que transporta a corrente  $i$ .

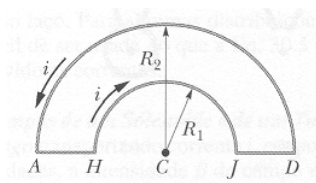


FIG. 30.33a

### Seção 30.2 – Força entre duas correntes paralelas

22E – Dois fios longos paralelos separados por uma distância  $d$  transportam correntes de  $i$  e  $3i$  no mesmo sentido. Localize o ponto ou pontos nos quais seus campos magnéticos se cancelam.

23E – Dois fios paralelos, retos e longos, separados por uma distância de 0,75 cm são perpendiculares ao plano da página, como mostrado na Fig. 30.40. O fio 1 transporta uma corrente de 6.5A para dentro da página. Qual deve ser a corrente (intensidade e sentido) no fio 2 para que o campo magnético resultante no ponto  $P$  seja nulo?

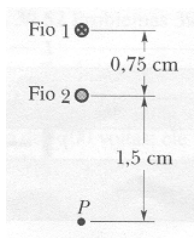


FIG. 30.40

### Seção 30.3 – A lei de ampère

31E – Cada um dos oito condutores da Fig. 30.46 transporta 2,0A de corrente para dentro ou para fora da página. Duas trajetórias são indicadas para a integral de linha  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ . Qual o valor da integral para a trajetória (a) à esquerda e (b) à direita?

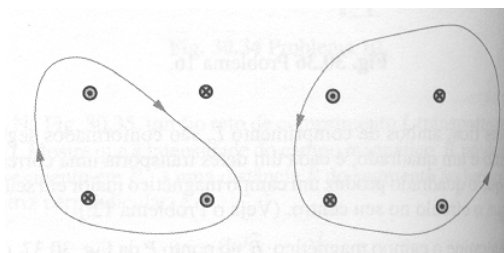


FIG. 30.46

### Seção 30.4 – Solenóide e toróides

40E – Um solenóide, com comprimento igual a 95,0 cm, possui um raio de 2,0cm e um enrolamento de 1200 voltas; ele transporta uma corrente de 3,60A. Calcule a intensidade do campo magnético no interior do solenóide.

41E – Um solenóide de 200 voltas tendo um comprimento de 25cm e um diâmetro de 10cm transporta uma corrente de 0,30A . Calcule a intensidade do campo magnético  $\vec{B}$ , no interior do solenóide.

## Capítulo 31: INDUÇÃO E MAGNETISMO

---

**Fluxo Magnético** O *fluxo magnético*  $\Phi_B$  através de uma área  $A$  em um campo magnético  $\vec{B}$  é definido como

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}, \quad (31.3)$$

onde a integral é calculada sobre toda a área. A unidade SI de fluxo magnético é o weber, onde  $1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2$ . Se  $\vec{B}$  for perpendicular à área e uniforme sobre ela, a Eq. 31.3 se torna

$$\Phi_B = BA \quad (\vec{B} \perp A, \vec{B} \text{ uniforme}) \quad (31.4)$$

**Lei da Indução de Faraday** Se o fluxo magnético  $\Phi_B$  através de uma área limitada por uma espira condutora fechada varia com o tempo, uma corrente e uma fem são produzidas na espira; este processo é chamado de *indução*. A fem induzida é

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Lei de Faraday}). \quad (31.6)$$

Se a espira for substituída por um bobina compacta de  $N$  voltas, a fem induzida é

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (31.7)$$

**Lei de Lenz** Uma corrente induzida possui um sentido tal que o campo magnético da *corrente* se opõe à variação do fluxo magnético que produz a corrente. A fem induzida possui o mesmo sentido que a corrente induzida.

**Fem e o Campo Elétrico Induzido** Uma fem é induzida por um fluxo magnético variável mesmo que a espira através da qual o fluxo esteja variando não seja um condutor físico, mas uma linha imaginária. O campo magnético variável induz um campo elétrico  $\vec{E}$  em cada ponto de tal espira imaginária; a fem induzida está relacionada com o campo elétrico  $\vec{E}$  por

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}, \quad (31.21)$$

onde a integração é feita ao redor da linha fechada. Da Eq. 31.21 podemos escrever a lei de Faraday em sua forma mais geral,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{lei de faraday}) \quad (31.22)$$

A essência desta lei é *que um campo magnético variável induz um campo elétrico  $\vec{E}$* .

**Indutores** um **indutor** é um dispositivo que pode ser usado para produzir um campo magnético conhecido em uma região especificada. Se uma corrente  $i$  for estabelecida através de cada um das  $N$  espiras de um indutor, um fluxo magnético  $\Phi_B$  enlaça essas espiras. A **indutância**  $L$  do indutor é

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} \quad (\text{definição de indutância}) \quad (31.30)$$

A unidade SI de indutância é o **henry** (H), sendo

$$1 \text{ henry} = 1 H = 1 T \cdot m^2 / A. \quad (31.31)$$

A indutância por unidade de comprimento próximo à região central de um solenóide longo com área da seção transversal  $A$  e  $n$  voltas por unidade de comprimento é

$$\frac{L}{l} = \mu_0 n^2 A \quad (\text{solenóide}). \quad (31.33)$$

**Auto-indução** Se uma corrente  $i$  em uma bobina variar com o tempo, uma fem é induzida na bobina. Esta fem auto-induzida é

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (31.37)$$

O sentido de  $\mathcal{E}_L$  é determinado a partir da lei de Lenz: a fem auto-induzida atua de forma a se por à variação que a produz.

**Circuitos  $RL$  em série** Se uma fem constante  $\mathcal{E}$  for introduzida em um circuito de malha simples contendo uma resistência  $R$  e um indutância  $L$ , a corrente aumentará até atingir um valor de equilíbrio igual a  $\mathcal{E} / R$  de acordo com

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau_L}) \quad (\text{subida da corrente}). \quad (31.43)$$

Nesta equação,  $\tau_L (= L / R)$  governa a taxa de crescimento da corrente e é chamada de **constante de tempo indutiva** do circuito. Quando a fonte de fem é removida, há um decaimento da corrente a partir de um valor  $i_0$  de acordo com

$$i = i_0 e^{-t/\tau_L} \quad (\text{decaimento da corrente}). \quad (31.47)$$

**Energia Magnética** Se um condutor  $L$  transporta uma corrente  $i$ , o campo magnético do indutor armazena uma energia dada por

$$U_B = \frac{1}{2} L i^2 \quad (\text{energia magnética}). \quad (31.51)$$

Se  $B$  é a intensidade de um campo magnético em qualquer ponto (em um indutor ou em qualquer outro local), a densidade de energia magnética armazenada nesse ponto é

$$\mu_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (\text{densidade de energia magnética}). \quad (31.56)$$

**Indução Mútua** Se duas bobinas (identificadas como 1 e 2) estão próximas uma da outra, uma corrente variável em uma delas pode induzir uma fem na outra. Esta indução mútua é descrita por

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (31.66)$$

e

$$\mathcal{E}_1 = -M \frac{di_2}{dt}, \quad (31.67)$$

Onde  $M$  (medido em henrys) é a indutância mútua para o conjunto das bobinas.

## EXERCÍCIOS

### Seção 31.4 – A lei de Lenz

2E – Uma pequena espira de área  $A$  está no interior de um solenóide longo de  $n$  voltas por unidade de comprimento que conduz uma corrente  $i$ . O seu eixo está na mesma direção do eixo do solenóide. Se  $i = i_0 \sin \omega t$ , determine a fem induzida na espira.

3E – O fluxo magnético através da espira mostrada na Fig. 31.33 cresce de acordo com a relação  $\Phi_B = 6,0t^2 + 7,0t$ , onde  $\Phi_B$  está em miliwebers e  $t$  está em segundos. (a) Qual a intensidade da fem induzida na espira quando  $t = 2,0s$ ? (b) Qual é o sentido da corrente que passa por  $R$ ?

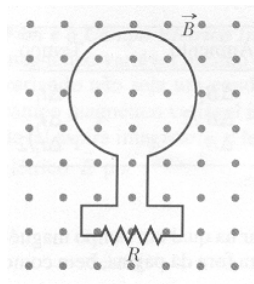


FIG. 31.33

5E – Um campo magnético uniforme é normal ao plano de uma espira circular de 10cm de diâmetro, feita de um fio de cobre (de diâmetro igual a 2,5mm). (a) Calcule a resistência do fio. (Veja a Tabela 27.1) (b) com que taxa o campo magnético tem que variar com o tempo para que apareça uma corrente induzida de 10A na espira?



TABELA 27.1 Resistividades de Alguns Materiais à Temperatura Ambiente (20°C)

Material	Resistividade, $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	Coefficiente de Resistividade de Temperatura, $\alpha$ ( $\text{K}^{-1}$ )
<i>Metais Típicos</i>		
Prata	$1,62 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-3}$
Cobre	$1,69 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-3}$
Alumínio	$2,75 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-3}$
Tungstênio	$5,25 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Ferro	$9,68 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Manganina <sup>a</sup>	$4,82 \times 10^{-8}$	$0,002 \times 10^{-3}$
<i>Semicondutores Típicos</i>		
Silício, puro	$2,5 \times 10^{-3}$	$-70 \times 10^{-3}$
Silício, tipo $n^b$	$8,7 \times 10^{-4}$	
Silício, tipo $p^c$	$2,8 \times 10^{-3}$	
<i>Isolantes Típicos</i>		
Vidro	$10^{10} \times 10^{14}$	
Quartzo fundido	$\sim 10^{16}$	

<sup>a</sup>Uma liga projetada especialmente para ter um pequeno valor de  $\alpha$ .<sup>b</sup>Silício puro dopado com impurezas de fósforo até uma densidade de portadores de  $10^{23} \text{ m}^{-3}$ .<sup>c</sup>Silício puro dopado com impurezas de alumínio até uma densidade de portadores de  $10^{23} \text{ m}^{-3}$ .

17P – Uma Bobina retangular de  $N$  voltas e comprimento  $a$  e largura  $b$  é girada a uma frequência  $f$  no interior de um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , como indicativo na Fig.31.40. A bobina está ligada a cilindros que giram junto com ela, contra os quais escovas metálicas deslizam para estabelecer contato. (a) Mostre que a fem induzida na bobina é dada (em função do tempo  $t$ ) por

$$\mathcal{E} = 2\pi f NabB \sin(2\pi ft) = \mathcal{E}_0 \sin(2\pi ft).$$

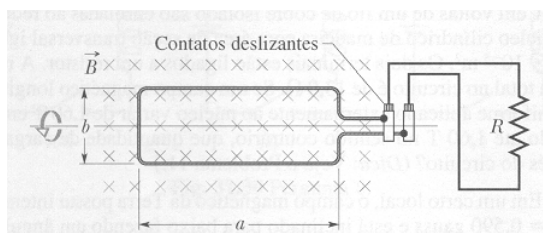


FIG. 31.40

Este é o princípio do gerador comercial de corrente alternada. (b) Projete uma espira que produzirá uma fem com  $\mathcal{E}_0 = 150\text{V}$  quando girada a  $60,00 \text{ rev/s}$  em um campo magnético uniforme de  $0,500\text{T}$ .

### Seção 31.5 – Indução e transferência de energia

25E – Se  $50,0 \text{ cm}$  de fio de cobre (diâmetro =  $1,00\text{mm}$ ) forem moldados na forma de uma espira circular e está for colocada perpendicularmente a um campo magnético uniforme que está

aumentando a uma taxa constante de  $10,0 \text{ mT/s}$ , a que taxa está sendo gerada energia térmica na espira?

27E – Uma haste metálica é forçada a se mover com velocidade constante  $\vec{v}$  ao longo de dois trilhos metálicos paralelos, ligados por uma tira de metal em uma extremidade, como mostrado na Fig. 31.46. Um campo magnético  $B = 0,350 \text{ T}$  aponta para fora da página. (a) Se os trilhos estiverem separados por uma distância de  $25,0 \text{ cm}$  e a velocidade escalar da haste for de  $55,0 \text{ cm/s}$ , qual a fem gerada? (b) Se a haste tiver uma resistência de  $18,0 \Omega$  e os trilhos e o conector tiverem resistência desprezível, qual a corrente na haste? (c) Com que taxa a energia está sendo transferida para energia térmica?

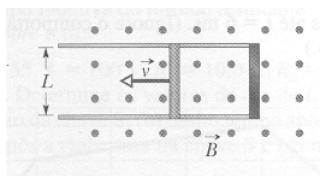


FIG. 31.46

30P – Dois trilhos condutores retos formam um ângulo reto no local onde suas extremidades são unidas. Uma barra condutora em contato com os trilhos parte do vértice no instante  $t = 0$  e se move com velocidade constante de  $5,20 \text{ m/s}$  ao longo deles, como mostrado na Fig. 31.48. Um campo magnético com  $B = 0,350 \text{ T}$  está dirigido para fora da página. Calcule (a) o fluxo que atravessa o triângulo formado pelos trilhos e pela barra em  $t = 3,00 \text{ s}$  e (b) a fem ao redor do triângulo neste instante. (c) Se escrevermos a fem como  $\mathcal{E} = at^n$ , onde  $a$  e  $n$  são constantes, qual o valor de  $n$ ?

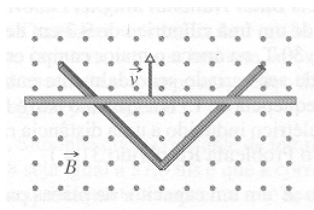


FIG. 31.48

## Capítulo 33: CORRENTE ALTERNADA

---

**Transferências de Energia em Circuitos LC** - Em um circuito LC oscilatório, a energia periodicamente se transfere em um vai-e-vem entre o campo elétrico do capacitor e o campo magnético do indutor; valores instantâneos das duas formas de energia são

$$U_E = \frac{q^2}{2C} \text{ e } U_B = \frac{Li^2}{2}, \quad (33.1, 33.2)$$

Onde  $q$  é a carga instantânea no capacitor e  $i$  é a corrente instantânea que atravessa o indutor. A energia total  $U(=U_E + U_B)$  permanece constante.

**Oscilações de Carga e de Corrente em Circuitos LC** - O princípio de conservação da energia conduz a

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{C} q = 0 \text{ (oscilações LC)} \quad (33.11)$$

Como sendo a equação diferencial de oscilações em um circuito LC (sem resistência). A solução da Eq.33.11 é

$$q = Q \cos(\omega t + \phi) \text{ (carga)}, \quad (33.12)$$

Onde  $Q$  é a *amplitude de carga* (carga máxima no capacitor) e a frequência angular  $\omega$  das oscilações é

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (33.4)$$

A constante de fase  $\phi$  na Equação 33.12 é determinada pelas condições iniciais (em  $t = 0$ ) do sistema.

A corrente  $i$  no sistema em qualquer instante  $t$  é

$$i = -\omega Q \sin(\omega t + \phi) \text{ (corrente)}, \quad (33.13)$$

Onde  $\omega Q$  é a *amplitude de corrente*  $I$ .

**Oscilações Amortecidas** - As oscilações em um circuito LC são amortecidas quando um elemento dissipativo  $R$  também estiver presente no circuito.<sup>3</sup> Assim

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0 \text{ (circuito RLC)}. \quad (33.24)$$

A solução desta equação diferencial é

---

<sup>3</sup> O circuito passa então a ser chamado de circuito RLC. (N.T.)

$$q = Qe^{-Rt/2L} \cos(\omega' t + \phi), \quad (33.25)$$

Onde

$$\omega' = \sqrt{\omega^2 - (R/2L)^2}. \quad (33.26)$$

Consideramos apenas situações com  $R$  pequena, portanto com pequeno amortecimento; então  $\omega' \approx \omega$ .

**Correntes Alternadas; Oscilações Forçadas** - Um circuito RLC em série pode entrar em *Oscilação forçada* a uma *frequência angular de excitação*  $\omega_d$  por uma *fem* alternada externa

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega_d t - \phi. \quad (33.28)$$

A corrente excitada neste circuito pela *fem* é

$$i = I \sin(\omega_d t - \phi), \quad (33.29)$$

Onde  $\phi$  é a constante de fase da corrente.

**Ressonância** A amplitude da corrente  $I$  em um circuito RLC em série excitado por um *fem* externa senoidal é máxima ( $I = \mathcal{E}_m / R$ ) quando a frequência angular de excitação  $\omega_d$  se iguala à frequência angular natural  $\omega$  do circuito (ou seja, quando o circuito entra em *ressonância*). Então,  $X_C = X_L$ ,  $\phi = 0$  e a corrente está em fase com a fem.

**Elementos de um Circuito Simples** A diferença de potencial alternada entre os terminais de um resistor possui amplitude  $V_R = IR$ ; a corrente está em fase com a diferença de potencial.

Para um *capacitor*,  $V_C = IX_C$ , onde  $X_C = 1/\omega_d C$  é a **reatância capacitiva**: a corrente neste caso está adiantada de  $90^\circ$  em relação à diferença de potencial ( $\phi = -90^\circ = -\pi/2 \text{ rad}$ ).

Para um *indutor*,  $V_L = IX_L$ , onde  $X_L = \omega_d L$  é a **reatância indutiva**: a corrente neste caso está atrasada de  $90^\circ$  em relação à diferença de potencial ( $\phi = +90^\circ = +\pi/2 \text{ rad}$ ).

**Circuitos RLC em série** Para um circuito RLC em série com uma *fem* externa dada pela Eq. 33.28 e uma corrente dada pela Eq. 33.29.

$$I = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (\omega_d L - 1/\omega_d C)^2}} \quad (\text{amplitude de corrente}) \quad (33.60, \quad 33.63)$$

$$e \quad \tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (\text{constante de fase}) \quad (33.65)$$

Definindo a impedância  $Z$  do circuito como

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (\text{impedância}) \quad (33.61)$$

Nos permite escrever a Eq.33.60 como  $I = \mathcal{E}_m / Z$ .

**Potência** Em um circuito RLC em série, a **potência média**  $P_{med}$  do gerador é igual à taxa de produção de energia térmica no resistor:

$$P_{med} = I_{rms}^2 R = \mathcal{E}_{rms} I_{rms} \cos \phi \quad (33.71, 33.76)$$

Nesta equação, rms se refere ao **valor médio quadrático** ou *valor eficaz*; as grandezas eficazes estão relacionadas com as grandezas máximas por  $I_{rms} = I / \sqrt{2}$ ,  $V_{rms} = V_m / \sqrt{2}$  e  $\mathcal{E}_{rms} = \mathcal{E}_m / \sqrt{2}$ . O termo  $\cos \phi$  é chamado de **fator de potência** do circuito.

**Transformadores** Um *transformador* (suposto ideal) é um núcleo de ferro sobre o qual são enroladas uma bobina primária de  $N_p$  voltas e uma bobina secundária de  $N_s$  voltas (ou espiras). Se a bobina primária for ligada aos terminais de um gerador de corrente alternada, as tensões (ou voltagens) no primário e no secundário estarão relacionadas por

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p} \quad (\text{transformação de voltagem}), \quad (33.79)$$

As correntes que atravessam as bobinas estão relacionadas por

$$I_s = I_p \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{transformação de corrente}), \quad (33.80)$$

E a resistência equivalente do circuito secundário, quando visto pelo gerador, é

$$R_{eq} = \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2 R, \quad (33.82)$$

Onde  $R$  é a carga resistiva no circuito secundário. A razão  $N_p / N_s$  é chamada de *relação de transformação* do transformador.

---

## RESPOSTAS

---

### A LEI DE COULOMB

1E -  $d \approx 1.4$  metros;

2E -  $F = 2.81N$ ;

3E - (a)  $m_2 = 4.9 \times 10^{-7} kg$  (b)  $q = 7.1 \times 10^{-11} C$ ;

4E -  $F' = \frac{3}{8} F$ ;

5P - (a)  $F_x = 0.17N$ ;  $F_y = -0.046N$ ;

8P -  $q_1 = -4q_2$ ;

9P - (a)  $x = \frac{L}{3}$ ;  $Q = \frac{4}{9} q$ ; (b) equilíbrio instável.

### A CARGA É QUANTIZADA

19E -  $q = 1.32 \times 10^{13} C$ ;

21E - (a)  $q = \pm 3.2 \times 10^{-19} C$  (b)  $n = 2$  elétrons;

22E - (a)  $F = 9 \times 10^{-19} N$  (b)  $N = 625$ ;

### CAMPOS ELÉTRICOS DEVIDO A UMA CARGA PONTUAL

4E -  $Q = 0.111 \times 10^{-19} C$ ;

6E - (a)  $E_1 = E_2 = 3.2 \times 10^5 N/C$  (b)  $F = 1.0 \times 10^{-13} N$ ;

9P - A 50cm de  $q_1$  e A 100cm de  $q_2$ ;

11P - zero;

12P -  $E = \frac{1}{\pi \epsilon_0} \frac{q}{a^2}$

13P -  $E = 1.02 \times 10^5 N/C$ ;  $\theta = 45^\circ$

### CAMPO ELÉTRICO DEVIDO A UM DIPOLO ELÉTRICO

14E -  $E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{2q}{z^2}$

15E -  $p = 6.88 \times 10^{-28} C \cdot m$

16P -  $E = k \frac{q \cdot d}{r^3}$

**UMA CARGA PONTUAL EM UM CAMPO ELÉTRICO**

29E -  $a = 3.51 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$ ;

(a)  $E = 1500 \text{ N/C}$ ; (b)  $F_e = 2.40 \times 10^{-16} \text{ N}$  (c)  $F_g = 1.64 \times 10^{-26} \text{ N}$

33E - (d)  $\frac{F_e}{F_g} = 1.46 \times 10^{10}$

36E - (a)  $a = 1.92 \times 10^{12} \text{ m/s}^2$ ; (b)  $v = 196 \text{ km/s}$ ;

**FLUXO DO CAMPO ELÉTRICO**

2E -  $\phi_E = -0.0151 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}$ ;

5E -  $\phi_E = 2.03 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}$ ;

**POTENCIAL ELÉTRICO**

1E - (a)  $3.02 \times 10^5 \text{ C}$ ; (b)  $W = 3.62 \text{ MJ}$ ;

2E -  $\Delta U \approx 11.98 \times 10^8 \text{ eV}$ ;

4E - (a)  $V_B - V_A = -2.46 \text{ V}$ ; (b)  $V_C - V_A = -2.46 \text{ V}$ ; (c)  $V_C - V_B = \text{zero}$ ;

**POTENCIAL DEVIDO A UM GRUPO DE CARGAS PONTUAIS**

13E - (a)  $V_A - V_B = -4.5 \text{ kV}$ ; (b)  $V_A - V_B = -4.5 \text{ kV}$ ;

15E -  $x = \frac{d}{4}$  e  $x = -\frac{d}{2}$ ;

**ENERGIA POTENCIAL ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE CARGAS PONTUAIS**

37E -  $U = -0.21 \frac{q^2}{\epsilon_0 a}$ ;

43P -  $v = 2.48 \times 10^3 \text{ m/s}$ ;

45P - (a)  $U_{\text{inicial}} = 0.225 \text{ J}$ ; (b)  $F = 0.2247 \text{ N}$ ; (c)  $U_{\text{final}} = 0.225 \text{ J}$ ;  
 $v_2 = 3.873 \text{ m/s}$   $v_1 = 7.746 \text{ m/s}$

**POTENCIAL DE UM CONDUTOR ISOLADO CARREGADO**

51E -  $q = 2.5 \times 10^{-8} \text{ C}$ ;

53P - (a)  $V = -180 \text{ V}$  (b)  $V_1 = 300 \text{ V}$ ;  $V_2 = -9000 \text{ V}$ ;

**CAPACITÂNCIA**

1E -  $q = 7.5 \text{ pC}$   $n = 46$  milhões de cargas elementares;

$$3E - q = 3 \times 10^{-3} C ;$$

$$5E - (a) C = 144 \times 10^{-12} F ; (b) q = 17.3 \times 10^{-9} C ;$$

### CAPACITORES EM PARALELO E EM SÉRIE

$$10E - C_{eq} \approx 7.33 \times 10^{-6} F ;$$

$$11E - n = 9091 \text{ capacitores};$$

$$12E - q = 315 \times 10^{-3} C ;$$

$$13E - C_{eq} \approx 3.15 \times 10^{-6} F ;$$

$$15P - C_{eq} = \frac{\epsilon_0 A}{a-b} ;$$

$$19P - (a) V_{ab} = 50V ; (b) q_1 = 5 \times 10^{-5} C ; (c) q_2 = 1.5 \times 10^{-4} C ;$$

### ENERGIA ARMAZENADA EM UM CAMPO ELÉTRICO

$$23E - C = 72 F ;$$

$$25 - U = 0.27 J ;$$

### CAPACITOR COM UM DIELÉTRICO

$$39E - k = 4.7 ;$$

$$41P - C = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} ;$$

$$43P - (a) E = 1 \times 10^4 V/m ; (b) q_e = 5 \times 10^{-9} C ; (c) q_i = 4.1 \times 10^{-9} C ;$$

### CORRENTE ELÉTRICA

$$1E - (a) q = 1200 C ; (b) N = 7.5 \times 10^{21} \text{ elétrons};$$

$$3P - \Delta t = 5.6 \times 10^{-3} s ;$$

### DENSIDADE DE CORRENTE

$$5E - (a) J = 6.42 A/m^2 ; (b) i = JA ;$$

$$7E - D = 3.8 \times 10^{-4} m ;$$

### RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE

$$13E - \rho = 2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m ;$$

$$15E - V = 100V ;$$

$$19E - R = 9R_0 = 9 \times 6 \Omega = 54 \Omega ;$$



$$21P - R_A / R_B = 3 ;$$

### POTÊNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

$$31E - P = 560W ;$$

$$32E - q = 14kC ;$$

$$33E - (a) P \approx 1000W ; (b) 25 \text{ centavos} ;$$

$$37E - (a) i = 10.87A ; (b) R = 10.58\Omega ; (c) E = 4.5 \times 10^6 J ;$$

### DIFERENÇAS DE POTENCIAL

$$2E - \Delta E = 1.1 \times 10^4 J ;$$

$$4E - (a) \text{ sentido anti-horário} ; (b) \text{ Fonte } \mathcal{E}_1 ; (c) V_B > V_A ;$$

$$5E - (a) i = 0,5A ; (b) P_2 = 2W ; (c) P_1 = 6W ; P_2 = 3W ;$$

$$9E - (a) V_{AB} = 50V ; (b) \mathcal{E} = 48V ; (c) V_D > V_B ;$$

### CIRCUITOS DE MULTIPLAS MALHAS

$$21E - i_1 = 0.05A ; i_2 = -0.06A ; V_A - V_B = 9V ;$$

$$23E - \text{lâmpada 2} ;$$

$$25E - D = 3d ;$$

### A DEFINIÇÃO DE $\vec{B}$

$$2E - \begin{array}{l} (a) F_{\max} = 9.56 \times 10^{-14} N ; F_{\min} = \text{zero} ; \\ (b) \theta = 0.267^\circ \end{array} ;$$

$$3E - (a) v = 4 \times 10^5 m/s ; (b) k = 835eV ;$$

$$4P - (a) F = +6.64 \times 10^{-14} k ; (b) F = -6.64 \times 10^{-14} k ;$$

### A DESCOBERTA DO ELÉTRON

$$7E - (a) v = 2.96 \times 10^7 m/s ; (b) \text{ sem deflexão} ;$$

$$8E - (a) 3.75 \times 10^3 m/s ;$$

### CAMPO MAGNÉTICO DEVIDO A UMA CORRENTE

$$1E - (a) B = 3.3 \times 10^{-6} T ; (b) \text{ irá afetar a leitura} ;$$

$$3E - (a) i = 16A ; (b) \text{ fluir do oeste para leste} ;$$

$$8P - B = \frac{\mu_0 i}{4} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right);$$

$$12P - B = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 i}{\pi a};$$

### FORÇA ENTRE DUAS CORRENTES PARALELAS

22E – P está a  $3d/4$  do fio que transporta a corrente  $3i$  ou a  $d/4$  do fio que transporta a corrente  $i$ ;

### A LEI DE AMPÉRE

$$31E - (a) \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = -2,5 \times 10^{-6} T \cdot m; (b) \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = zero;$$

### SOLENOÍDE

$$41E - B = 3 \times 10^{-4} T;$$

### A LEI DE LENZ

$$2E - \mathcal{E} = -\mathcal{E}_0 \cos \omega t;$$

$$(a) R = 1.1 \times 10^{-13} \Omega$$

$$5E - (b) \left| \frac{dB}{dt} \right| = 1.4 T / s;$$