

FÍSICA

VOLUME 3

ensino médio

**Antônio Máximo
Beatriz Alvarenga**

**PROGRAMA LIVRO NA ESCOLA
2006**



**GOVERNO
DE MINAS**

VENDA PROIBIDA - LA

editora scipione

F Í S I C A
livro não-consumível

FÍSICA

VOLUME 3

ensino médio

Antônio Máximo Ribeiro da Luz

*Professor Adjunto do Departamento de
Física da Universidade Federal de Minas Gerais*

Beatriz Alvarenga Álvares

*Professora Emérita do Departamento de Física da
Universidade Federal de Minas Gerais*

BEATRIZ ALVARENGA e ANTÔNIO MÁXIMO são autores da coleção *Física*, em dois volumes, editada pela Oxford University Press em língua espanhola, e do *Física* — volume único, editado pela Scipione.

ilustrações de
Rubens Villaça e Paulo César Pereira

São Paulo, 2006
1.ª edição

F Í S I C A
livro não-consumível



editora scipione

E. E. "Lúcio dos Santos"
Biblioteca "Pres. Antonio Carlos"
12.10.06 Ass. *[Signature]*

Ao estudante

Ao preparar este texto, uma de nossas preocupações foi tornar o seu curso de Física interessante e agradável, tentando evitar que você o considere apenas como mais uma de suas obrigações escolares. Julgamos que ele poderá entusiasmar tanto aos jovens que pretendam continuar seus estudos em uma carreira ligada às ciências exatas, como àqueles que provavelmente não mais terão outro contato com o estudo da Física.

O conhecimento das leis e fenômenos físicos constitui um complemento indispensável à formação cultural do homem moderno, não só em virtude do grande desenvolvimento científico e tecnológico do mundo atual, como também porque o mundo da Física nos rodeia por completo. De fato, a Física está totalmente envolvida em nossa vida diária: está em nossa casa, no ônibus, no elevador, no cinema, no campo de futebol etc.

Assim, com a orientação de seu professor, lendo com atenção os textos de cada capítulo, discutindo com seus colegas e procurando realizar as atividades sugeridas, esperamos que, ao final deste curso, você tenha conseguido compreender as leis fundamentais da Física, percebendo que elas representam modelos que procuram traduzir a harmonia e a organização presentes na natureza. Esta visão, possivelmente, fará crescer dentro de você o amor e o respeito pelas coisas e fatos do mundo em que vivemos. Ao mesmo tempo, entre seus sentimentos passará a figurar, por certo, a admiração aos grandes cientistas que, através de árduos esforços, conseguiram edificar este importante ramo do conhecimento humano.

Os autores

Como usar esta obra

Desenvolvemos os textos e as diversas atividades que compõem este livro tendo sempre em mente a produção de um trabalho que se constitua um auxílio real a seus estudos e à sua aprendizagem. Esperando que este propósito possa ser concretizado, apresentamos, a seguir, algumas orientações que, acreditamos, o levarão a conhecer melhor seu livro e, conseqüentemente, a usá-lo com o máximo proveito:

- ▶ Inicie sempre o estudo de um determinado assunto com a leitura da secção que o aborda. A linguagem simples e a divisão do texto em pequenos blocos, com títulos indicativos de seu conteúdo, facilitam esta tarefa. Procure compreender o tópico exposto e, se houver dúvida, discuta-a com o professor e com seus colegas. Não tente apenas memorizar eventuais fórmulas ali presentes, pois a fórmula isolada pouco ou nada representa do conhecimento que ela sintetiza. A leitura e a compreensão do texto são passos indispensáveis à construção deste conhecimento.
- ▶ Depois de terminar a leitura de cada secção, passe à solução dos Exercícios de Fixação apresentados logo após cada uma delas. Esses exercícios serão, geralmente, resolvidos com certa facilidade, colaborando para sedimentar o conhecimento em estudo e para incentivá-lo a prosseguir em outras atividades. Não passe para a secção seguinte nem tente resolver problemas mais sofisticados, antes de responder a todos os Exercícios de Fixação. Seu raciocínio não pode dar saltos muito grandes e estes exercícios foram propostos exatamente para você ir construindo seus conhecimentos passo a passo.

- ▶ O Tópico Especial, como indica o seu subtítulo, *para você aprender um pouco mais*, foi desenvolvido como uma extensão aos conhecimentos ali abordados. Usando uma linguagem simples e um tratamento qualitativo da matéria, com quase nenhum apelo à matemática, esse texto ora apresenta aspectos históricos do assunto, ora uma visão mais moderna dos conceitos e leis a ele relacionados ou, ainda, suas aplicações tecnológicas interessantes e atuais. Estamos convictos de que você irá apreciar a leitura de um desses tópicos especiais e esteja certo de que a Física neles contida é de tão boa qualidade quanto a do restante do capítulo.
- ▶ A Revisão, que aparece no final de cada capítulo, é uma espécie de estudo dirigido, proposto para que você obtenha uma visão global do assunto, após ter estudado cada seção separadamente. Ao completar essa atividade, você terá em mãos um resumo deste capítulo, ao qual poderá recorrer quando desejar recapitulá-lo rapidamente.
- ▶ Outra atividade importante para facilitar a compreensão e a aprendizagem dos temas apresentados em um capítulo são as Experiências propostas no final de cada um. Escolhemos experiências bem simples, que, em geral, requerem material disponível em sua própria residência, possibilitando, assim, sua realização como tarefa para casa. Não deixe de fazer essas experiências e levá-las à escola para serem discutidas com seu professor e seus colegas. Temos certeza de que essas atividades lhe darão muitos momentos de prazer e lhe permitirão uma visão mais clara e concreta dos fenômenos em estudo.
- ▶ Os problemas, comumente usados nos cursos de Física para que os estudantes testem e apliquem seus conhecimentos, são apresentados em três séries em nosso texto: Problemas e Testes, Questões de Vestibular e Problemas Suplementares. Sendo muito grande o número total desses problemas, você, provavelmente, não terá tempo para resolver todos eles. Peça, então, para seu professor selecionar aqueles que forem mais significativos para seu curso e para o seu próprio contexto.

Procurando soluções para eles, você estará subindo mais alguns degraus em sua formação científica.

Sumário

VOLUME 3

<i>Ao estudante</i>	3
<i>Como usar esta obra</i>	4
Unidade 8 — Campo e Potencial Elétrico	11
17 Carga elétrica	12
17.1. Eletrização	13
17.2. Condutores e isolantes	18
17.3. Indução e polarização	19
17.4. Eletroscópios	22
17.5. Lei de Coulomb	25
17.6. As primeiras descobertas no campo da eletricidade	32
<i>Revisão</i>	37
<i>Algumas Experiências Simples</i>	38
<i>Problemas e Testes</i>	40
<i>Problemas Suplementares</i>	43
18 Campo Elétrico	45
18.1. O conceito de campo elétrico	46
18.2. Campo elétrico criado por cargas pontuais	50
18.3. Linhas de força	54
18.4. Comportamento de um condutor eletrizado	58
18.5. Rigidez dielétrica – Poder das pontas	63
<i>Revisão</i>	68
<i>Algumas Experiências Simples</i>	69
<i>Problemas e Testes</i>	70
<i>Problemas Suplementares</i>	73

19 Potencial Elétrico	76
19.1. Diferença de potencial	77
19.2. Voltagem em um campo uniforme	81
19.3. Voltagem no campo de uma carga puntual	84
19.4. Superfícies equipotenciais	89
19.5. O gerador de Van de Graaff	93
Revisão	99
<i>Algumas Experiências Simples</i>	99
<i>Problemas e Testes</i>	101
<i>Problemas Suplementares</i>	105
Unidade 9 — Circuitos elétricos de corrente contínua	107
20 Corrente Elétrica	108
20.1. Corrente elétrica	109
20.2. Circuitos simples	113
20.3. Resistência elétrica	116
20.4. A lei de Ohm	125
20.5. Associação de resistências	128
20.6. Instrumentos elétricos de medida	136
20.7. Potência em um elemento do circuito	139
20.8. Variação da resistência com a temperatura	148
Revisão	154
<i>Algumas Experiências Simples</i>	155
<i>Problemas e Testes</i>	158
<i>Problemas Suplementares</i>	163
21 Força Eletromotriz – Equação do Circuito	167
21.1. Força eletromotriz	168
21.2. A equação do circuito	175
21.3. Voltagem nos terminais de um gerador	181
21.4. A válvula eletrônica e o transistor	184
Revisão	193
<i>Algumas Experiências Simples</i>	193
<i>Problemas e Testes</i>	195
<i>Problemas Suplementares</i>	200

Unidade 10 — Eletromagnetismo	204
22 O Campo Magnético – 1ª parte	205
22.1. Magnetismo	206
22.2. Eletromagnetismo	209
22.3. Campo magnético	212
22.4. Movimento circular em um campo magnético	219
22.5. Força magnética em um condutor	221
22.6. O ciclotron	228
Revisão	233
<i>Algumas Experiências Simples</i>	234
<i>Problemas e Testes</i>	236
<i>Problemas Suplementares</i>	241
23 O Campo Magnético – 2ª parte	244
23.1. Campo magnético de um condutor retilíneo	245
23.2. Campo magnético no centro de uma espira circular	248
23.3. Campo magnético de um solenóide	250
23.4. Influência do meio no valor do campo magnético	254
23.5. A descoberta do elétron	261
Revisão	268
<i>Algumas Experiências Simples</i>	269
<i>Problemas e Testes</i>	270
Apêndice E	276
E.1. A lei de Biot-Savart	276
E.2. Aplicações da lei de Biot-Savart	279
<i>Problemas Suplementares</i>	283
24 Indução Eletromagnética – Ondas Eletromagnéticas	287
24.1. Força eletromotriz induzida	288
24.2. A lei de Faraday	291
24.3. A lei de Lenz	299
24.4. O transformador	302
24.5. Ondas eletromagnéticas	304
24.6. O espectro eletromagnético	311
24.7. Transmissão e distribuição de energia elétrica	318
Revisão	324
<i>Algumas Experiências Simples</i>	325
<i>Problemas e Testes</i>	327

Apêndice F	332
F.1. Capacitores	332
F.2. Associação de capacitores	338
F.3. Energia em um capacitor	343
<i>Revisão</i>	346
<i>Problemas e Testes</i>	347
25 A Nova Física	349
25.1. Uma visão panorâmica	350
25.2. O mundo do muito pequeno – Quais são as partículas elementares	351
25.3. O mundo do muito grande	354
25.4. O mundo das estruturas complexas	356
<i>Questões de Vestibular</i>	361
<i>Questões de Interpretação de Textos</i>	387
<i>Respostas dos exercícios</i>	393
<i>Valores das Funções Trigonométricas</i>	413
<i>Constantes Físicas</i>	414

VOLUME 1

Unidade 1 — Introdução

1. Algarismos Significativos

Unidade 2 — Cinemática

2. Movimento Retilíneo

3. Vetores – Movimento Curvilíneo

Unidade 3 — Leis de Newton

4. Primeira e Terceira Leis de Newton

5. Segunda Lei de Newton

6. Gravitação Universal

7. Hidrostática

Unidade 4 — Leis de Conservação

8. Conservação da energia

Questões de Vestibular

Respostas

Constantes Físicas

Valores das Funções Trigonométricas

VOLUME 2

Unidade 4 — Leis de Conservação

9. Conservação da Quantidade de Movimento

Unidade 5 — Temperatura — Dilatação — Gases

10. Temperatura e Dilatação

11. Comportamento dos Gases

Unidade 6 — Calor

12. Primeira Lei da Termodinâmica

13. Mudanças de Fase

Unidade 7 — Ótica — Ondas

14. Reflexão da Luz

15. Refração da Luz

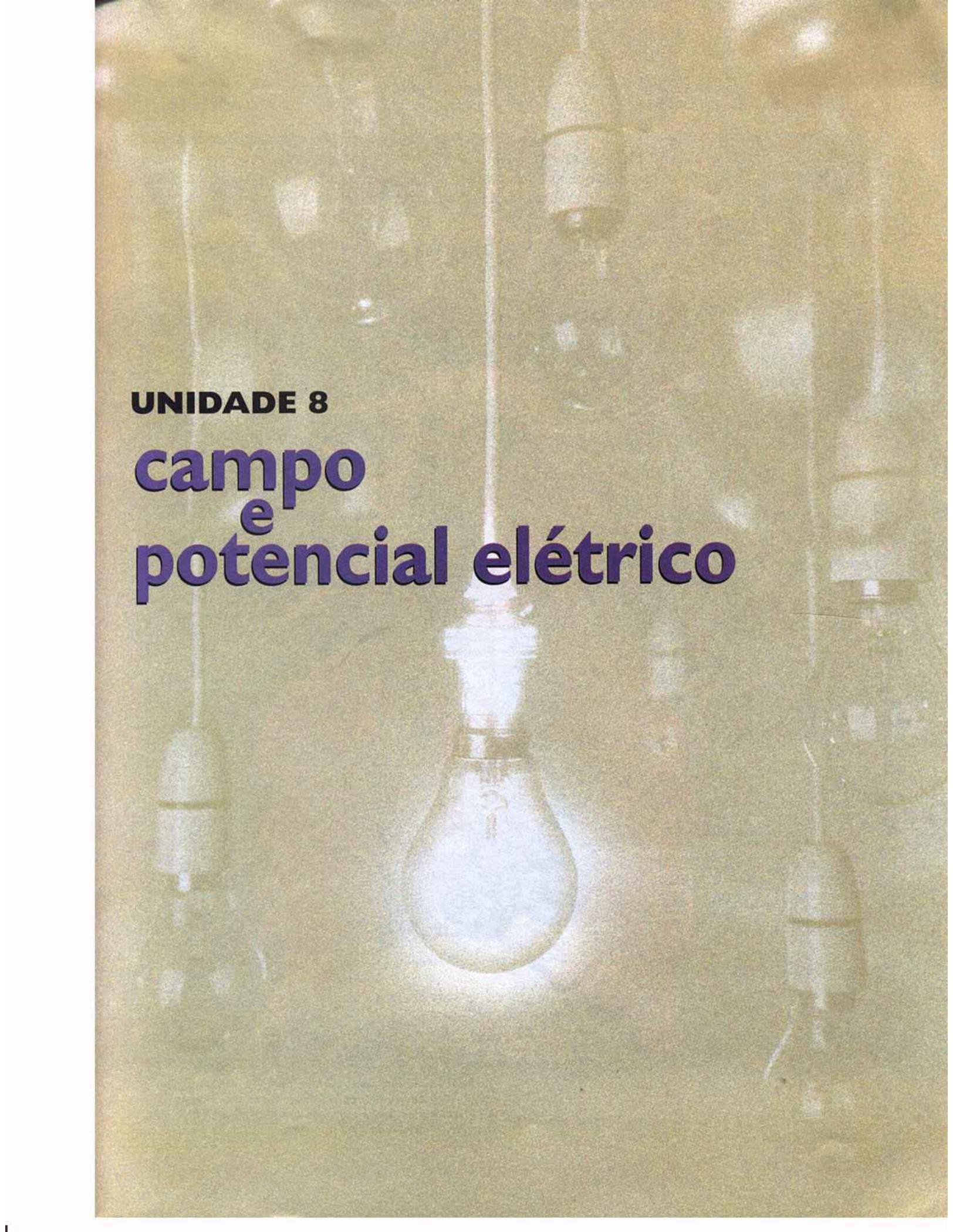
16. Movimento Ondulatório

Questões de Vestibular

Respostas

Constantes Físicas

Valores das Funções Trigonométricas



UNIDADE 8

**campo
e
potencial elétrico**

capítulo 17

Carga elétrica



Peter Menzel/SPL/Stock Photos

Os fios de cabelo desta garota foram eletrizados com cargas elétricas de mesmo sinal e, por isso, eles se repelem. A esfera vista na foto é parte da máquina eletrostática que transfere eletricidade para a pessoa.

Neste capítulo estamos iniciando o estudo da *Eletricidade*, isto é, vamos analisar e procurar entender uma grande variedade de fenômenos, muito ligados à nossa vida diária, denominados *fenômenos elétricos*. Realmente, a todo instante estamos nos relacionando com fatos de natureza elétrica e nosso modo de vida depende acentemente de técnicas e aparelhos elétricos modernos (fig. 17-1).

O nosso curso de Eletricidade será desenvolvido em três etapas, correspondentes às unidades VIII, IX e X. Na unidade VIII (capítulos 17, 18 e 19) analisaremos situações nas quais vamos encontrar as cargas elétricas geralmente em repouso. Por este motivo, esta etapa é habitualmente denominada *Eletrostática*.

Na unidade IX (capítulos 20 e 21) estudaremos as cargas elétricas em movimento, isto é, as *correntes elétricas* e as propriedades dos *circuitos elétricos* que são percorridos por estas correntes.

Na última etapa (unidade X: capítulos 22, 23 e 24) faremos uma análise dos fenômenos magnéticos que, como veremos, são causados por cargas elétricas em movimento. Esta parte da Eletricidade, envolvendo relações entre as cargas elétricas e os fenômenos magnéticos, é denominada *Eletromagnetismo*.



Fig. 17-1: Nossa vida está intimamente relacionada com os fenômenos de natureza elétrica.

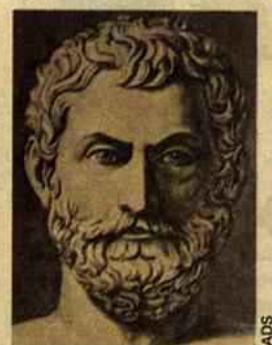
17.1. Eletrização

INTRODUÇÃO

As primeiras descobertas das quais se tem notícia, relacionadas com fenômenos elétricos, foram feitas pelos gregos, na Antiguidade. O filósofo e matemático Thales, que vivia na cidade de Mileto no século VI a.C., observou que um pedaço de âmbar*, após ser atritado com uma pele de animal, adquiria a propriedade de atrair corpos leves (como pedaços de palha e sementes de grama).

Thales de Mileto (580-546 a.C.)

Filósofo grego, conhecido por suas teorias cosmológicas baseadas na hipótese de ser a água o constituinte de toda a matéria existente no universo. Não há escritos sobre a vida de Thales, sendo, portanto, difícil o conhecimento de sua obra. O historiador grego Heródoto fala sobre os trabalhos de Thales no campo da Geometria, que ele aprendeu com os egípcios, creditando-lhe a demonstração de cinco teoremas. Aristóteles, em seus escritos, atribuiu a Thales a afirmação de que o ímã e o âmbar possuíam alma, porque podiam atrair coisas, isto é, Thales afirmava que até os objetos inanimados possuíam vida.



Somente cerca de 2 000 anos mais tarde é que começaram a ser feitas observações sistemáticas e cuidadosas de fenômenos elétricos, destacando-se os trabalhos do médico inglês W. Gilbert. Este cientista observou que vários outros corpos, ao serem atritados, se comportavam como o âmbar e que a atração

* O âmbar é uma pedra amarelada, que se origina na fossilização de resinas provenientes de árvores de madeira macia.

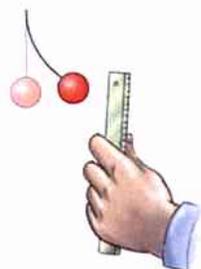
exercida por eles se manifestava sobre qualquer outro corpo, mesmo que este não fosse leve.

Como a palavra grega correspondente a âmbar é *eléctron*, Gilbert passou a usar o termo “eletrizado” ao se referir àqueles corpos que se comportavam como o âmbar, surgindo assim as expressões “eletrização”, “eletricidade” etc.



William Gilbert (1544-1603)

Nasceu em Essex, tornando-se o cientista de maior projeção na Inglaterra durante o reinado de Elizabeth I. Embora tenha estudado Medicina, tornando-se um médico de renome, seu trabalho mais importante está transcrito na obra publicada em 1600: *De magnete, magneticisque corporibus et de magno magnete tellure*, isto é, *Sobre os ímãs, os corpos magnéticos e o grande ímã terrestre*. Nesta obra de Gilbert, publicada após vários anos de experiências, ele apresenta suas teorias sobre os corpos magnéticos e as atrações elétricas. Ele foi o primeiro a usar os termos atração elétrica, força elétrica e pólo do ímã. Muitos historiadores consideram Gilbert como o pai do estudo da Eletricidade.



Modernamente sabemos que todas as substâncias podem apresentar comportamento semelhante ao âmbar, isto é, podem ser eletrizadas ao serem atritadas com outra substância. Por exemplo: uma régua de plástico se eletriza ao ser atritada com seda e atrai uma bola de isopor (fig. 17-2-a); um pente se eletriza ao ser atritado nos cabelos de uma pessoa e atrai estes cabelos (fig. 17-2-b) ou um filete de água (fig. 17-2-c); uma roupa de náilon se eletriza ao se atritar com nosso corpo; um automóvel em movimento se eletriza pelo atrito com o ar etc.



Fig. 17-2: Ilustração esquemática. Qualquer substância pode ser eletrizada ao ser atritada com outra.

CARGA POSITIVA E CARGA NEGATIVA



Fig. 17-3: Ilustração esquemática. Quando uma barra de vidro é atritada com seda, a barra fica eletrizada positivamente.



Fig. 17-4: Ilustração esquemática. Quando uma barra de borracha é atritada com lã, a barra fica eletrizada negativamente.

Realizando-se experiências com vários corpos eletrizados, verificou-se que eles podem ser separados em dois grupos distintos:

1º GRUPO constituído pelos corpos que têm comportamento igual ao de uma barra de vidro atritada com seda. Verifica-se que todos os corpos eletrizados deste grupo repelem-se uns aos outros. Diz-se que estes corpos estão *eletrizados positivamente* ou que, ao serem atritados, adquiriram uma *carga elétrica positiva* (fig. 17-3).

2º GRUPO constituído pelos corpos que se comportam como uma barra de borracha atritada com um pedaço de lã. Verifica-se também que todos os corpos deste grupo repelem-se uns aos outros, mas atraem os corpos do grupo anterior. Dizemos que os corpos deste 2º grupo estão *eletrizados negativamente* ou que possuem *carga negativa* (fig. 17-4).

Chegamos, portanto, à seguinte conclusão:

existem dois tipos de cargas elétricas: cargas positivas e cargas negativas. As cargas elétricas de mesmo nome (mesmo sinal) se repelem e as cargas de nomes contrários (sinais contrários) se atraem (fig. 17-5).

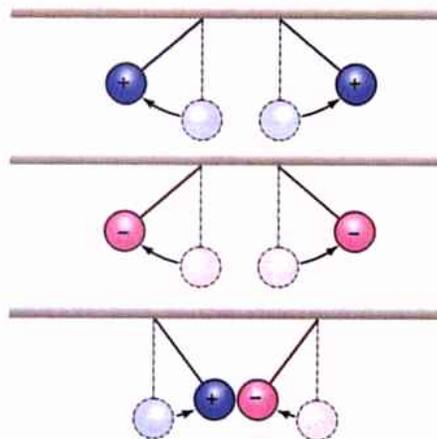


Fig. 17-5: Ilustração esquemática. Corpos eletrizados com eletricidade de nomes contrários se atraem e com nomes iguais se repelem.

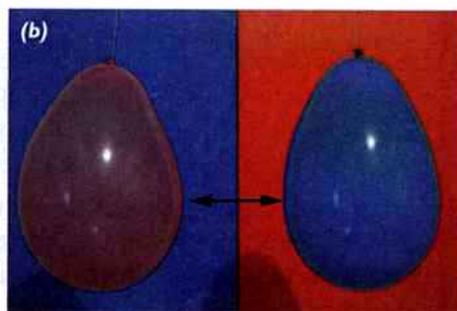
POR QUE UM CORPO SE ELETRIZA

O famoso político e cientista americano Benjamin Franklin, após realizar um grande número de observações experimentais, constatou que, quando dois corpos são atritados um contra o outro, se um deles se eletrizar positivamente, o outro, necessariamente, irá adquirir carga elétrica negativa. Por exemplo: quando uma barra de vidro é atritada com seda, o vidro adquire carga positiva e a seda fica eletrizada negativamente (fig. 17-6).

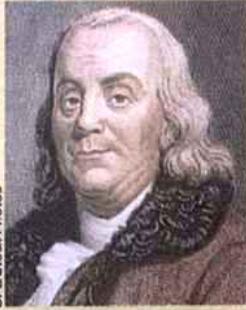
Procurando uma explicação para este fato, Franklin formulou uma teoria, segundo a qual os fenômenos elétricos eram produzidos pela existência de um fluido elétrico que estaria presente em todos os corpos. Em um corpo não eletrizado (corpo neutro) este fluido existiria em “quantidade normal”. Quando dois corpos eram atritados entre si, haveria transferência de parte do fluido elétrico de um para o outro. O corpo que recebesse fluido ficaria eletrizado positivamente e aquele que perdesse ficaria eletrizado negativamente. Desta maneira, segundo as idéias de Franklin, não haveria criação nem destruição de carga elétrica, mas apenas transferência de eletricidade de um corpo para outro, isto é, a quantidade total de fluido elétrico permaneceria constante.



Fig. 17-6: Quando uma barra de vidro é atritada com seda, o vidro adquire carga positiva e a seda fica eletrizada negativamente.



Os balões, após serem atritados com náilon, são aproximados um do outro (a). Ao serem abandonados, eles se repelem (b).



Benjamin Franklin (1706-1790)

Um dos homens mais conhecidos e admirados na segunda metade do século XVIII nos Estados Unidos. Nascido em Boston, Franklin teve uma infância difícil e aos 12 anos já trabalhava como impressor. Mais tarde tornou-se jornalista, ampliou suas atividades e em 1748 começou a se dedicar ao estudo da ciência. Embora tenha se dedicado a estas atividades durante pouco tempo, pois logo passou a se preocupar com a política, deve-se a Franklin a invenção de vários aparelhos, entre eles o pára-raios. Em sua carreira política, Franklin teve oportunidade de lutar na guerra da Independência das Colônias Americanas (Estados Unidos) contra a Inglaterra, tornando-se um verdadeiro herói nacional.

Atualmente sabemos que a teoria de Franklin era, pelo menos, parcialmente correta. De acordo com as descobertas realizadas neste século, sabe-se que realmente o processo de eletrização consiste na transferência de carga elétrica entre os corpos que se atritam. Entretanto, esta transferência não é feita através do fluido elétrico imaginado por Franklin mas, sim, pela *passagem de elétrons* de um corpo para outro.

Como você já deve saber, a moderna teoria atômica nos ensina que toda matéria é constituída, basicamente, pelas partículas denominadas *prótons*, *nêutrons* e *elétrons*. Os prótons possuem carga positiva, os nêutrons não possuem carga elétrica e os elétrons possuem carga negativa.

Em um corpo neutro (não eletrizado) o número de prótons é igual ao número de elétrons. Ao atritarmos dois corpos entre si, há *transferência de elétrons* de um corpo para o outro. Aquele que perde elétrons apresenta-se com excesso de prótons, isto é, fica eletrizado positivamente. É claro que o outro corpo ficará eletrizado negativamente, pois apresenta-se com excesso de elétrons.

Podemos, então, destacar:

um corpo em seu estado normal, não eletrizado, possui um número de prótons igual ao número de elétrons. Se este corpo perder elétrons, estará com excesso de prótons, isto é, apresentar-se-á eletrizado positivamente. Se ele receber elétrons, possuirá um excesso destas partículas e estará eletrizado negativamente.

COMENTÁRIOS

- 1) Devemos observar, no processo de eletrização, que o número total de prótons e elétrons não se altera, havendo apenas uma separação das cargas elétricas. Não há, portanto, criação nem destruição de carga elétrica, isto é, a carga total é conservada, como pensava Franklin.
- 2) Como você sabe, os prótons e os nêutrons estão localizados no núcleo do átomo e não podem ser deslocados de suas posições pelo simples atrito de um corpo com outro. Pelo atrito, apenas os elétrons podem ser trocados entre os dois corpos.

- 3) O atrito entre os corpos é uma maneira de fazer com que eles se aproximem bastante para que os átomos de um possam interagir com os átomos do outro. Perderá elétrons o átomo que exercer menor força sobre eles. Assim, um mesmo corpo poderá se eletrizar positivamente ou negativamente, dependendo do corpo com o qual for atritado. Por exemplo: a seda, que atritada com vidro adquire carga negativa (porque retira elétrons do vidro), quando atritada com borracha adquire carga positiva (perde elétrons para a borracha).

A título de curiosidade apresentamos, na tabela 17-1, algumas substâncias, ordenadas de tal modo que qualquer uma delas adquire carga positiva quando atritada com as substâncias que a seguem e adquire carga negativa quando atritada com as que a precedem.

Plexiglass
Vidro
Marfim
Lã
Madeira
Papel
Seda
Enxofre

Tabela 17-1.

As forças que mantêm ligadas as partículas de um corpo

Sabemos que é necessário exercer forças para quebrar um objeto sólido qualquer, como, por exemplo, para dividir o lápis da fig. I, ao longo da linha *AB*. Portanto, devem existir forças de atração que unem as partes que estão de um lado e do outro da linha *AB*. Essas forças teriam origem elétrica ou gravitacional?

Já sabemos, do nosso estudo de Gravitação Universal, que a força gravitacional entre dois objetos de “tamanho comum” (duas pedras, duas pessoas etc.) é extremamente pequena. Então, esta força não poderia ser responsável pela ligação tão forte existente entre as duas partes do lápis que tentamos quebrar. Na realidade, os cientistas, ao estudarem essas ligações, chegaram à conclusão de que elas são devidas às forças elétricas que se manifestam entre as partículas do corpo. No caso do lápis, portanto, as forças representadas na fig. I são forças elétricas que existem entre as partículas situadas de um lado e de outro da linha *AB*. Estas partículas, que fazem parte da estrutura atômico-molecular do material de que é feito o lápis, como já vimos, são eletrizadas.

De maneira semelhante, as forças que mantêm unidas as diversas partes do nosso corpo são, também, de origem elétrica, como procuramos ilustrar na fig. II. Esta idéia é ainda válida para as forças de ligação entre as partículas constituintes de todos os objetos que nos rodeiam (de “tamanho comum”), como as paredes de uma casa, um cabo de aço, os diversos tipos de cola etc.

Se considerarmos corpos de massa cada vez maior, as forças gravitacionais entre as diversas partes do corpo vão se superpondo, tornando-se, então, cada vez mais intensas. Para um certo valor da massa do corpo, elas se tornam tão importantes para manter a ligação quanto as forças elétricas. Esta situação ocorre para corpos de dimensões próximas de um pequeno asteroide (cerca de 100 km de diâmetro).

Para corpos de dimensões ainda maiores, como um planeta ou uma estrela, há predominância absoluta das forças gravitacionais que mantêm a sua coesão (a colaboração das forças elétricas para esta coesão é desprezível). É em virtude da predominância ora da força elétrica, ora da força gravitacional, que um corpo sólido de tamanho comum pode ter uma forma qualquer, enquanto um grande corpo celeste tende a tomar sempre uma forma esférica.

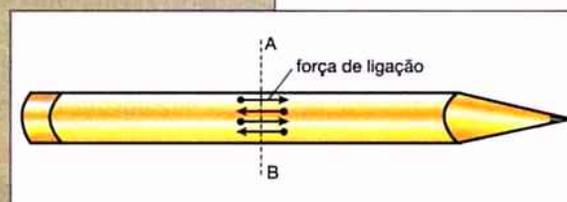


Figura I.



Figura II.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Duas folhas de um mesmo tipo de papel são atritadas entre si. Elas ficarão eletrizadas? E se atritarmos duas barras feitas de um mesmo tipo de plástico? Explique.
- Considerando a fig. 17-4 responda:
 - O pedaço de lã ficou eletrizado?
 - Qual o sinal da carga no pedaço de lã?
 - Qual dos dois corpos recebeu elétrons?
 - Qual dos dois corpos ficou com excesso de prótons?
- No processo de eletrização mostrado na fig. 17-6, o número de elétrons em excesso na seda (módulo da carga na seda) é maior, menor ou igual ao número de prótons em excesso no vidro (quantidade de carga no vidro)?
- Um pedaço de marfim é atritado com uma folha de papel.
 - Qual será o sinal da carga elétrica que cada um adquire (consulte a tabela 17-1)?
 - Qual deles perdeu elétrons?
- Uma barra de plexiglass é atritada com um pedaço de lã e uma pedra de enxofre é atritada com uma folha de papel. Consultando a tabela 17-1, responda se a barra de plexiglass vai atrair ou repelir:
 - a folha de papel.
 - a pedra de enxofre.

17.2. Condutores e isolantes

O QUE É UM CONDUTOR DE ELETRICIDADE

Conforme dissemos na secção anterior, os corpos são constituídos de átomos e estes possuem partículas eletrizadas (prótons e elétrons). Quando vários átomos se reúnem para formar certos sólidos, como, por exemplo, os metais, os elétrons das órbitas mais externas não permanecem ligados aos respectivos átomos, adquirindo liberdade de se movimentar no interior do sólido. Estes elétrons são denominados *elétrons livres* (fig. 17-7).

Portanto, nos sólidos que possuem elétrons livres, é possível que a carga elétrica seja transportada através deles e, por isto, dizemos que estas substâncias são *condutores de eletricidade*. Por exemplo: se ligarmos os pólos de uma bateria por meio de um fio metálico (fig. 17-8), os elétrons livres do metal entrarão em movimento, deslocando-se de um pólo para o outro. Assim, as cargas elétricas estarão se deslocando através do fio, constituindo uma corrente elétrica (que estudaremos mais tarde).

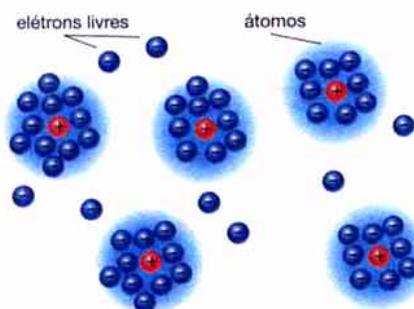


Fig. 17-7: Ilustração esquemática. Nos metais, os elétrons das órbitas mais externas não permanecem ligados aos átomos e são denominados *elétrons livres*.



Fig. 17-8: Ilustração esquemática. Quando os pólos de uma bateria são ligados por meio de um fio metálico, os elétrons livres no interior do fio entram em movimento.

Temos, então, em resumo:

os sólidos que, como os metais, possuem elétrons livres em seu interior, permitem o deslocamento de carga elétrica através deles sendo, por este motivo, denominados *condutores de eletricidade*.

O QUE É UM DIELÉTRICO

Ao contrário dos condutores, existem sólidos nos quais os elétrons estão firmemente ligados aos respectivos átomos, isto é, estas substâncias não possuem elétrons livres (ou o número de elétrons livres é relativamente pequeno). Portanto, não será possível o deslocamento de carga elétrica através destes corpos, que são denominados *isolantes elétricos* ou *dielétricos*. A porcelana, a borracha, o vidro, o plástico, o papel, a madeira etc. são exemplos típicos de substâncias isolantes. Assim, na fig. 17-8, se usarmos qualquer uma destas substâncias para ligar os pólos da bateria entre si, não seria observado nenhum movimento de cargas elétricas nesta ligação, isto é, não haveria corrente elétrica através da substância.

COMENTÁRIOS

1) Considere um corpo metálico, carregado negativamente, apoiado em um suporte isolante (fig. 17-9-a). Suponha que este corpo seja ligado à Terra por meio de um condutor como, por exemplo, um fio de cobre (observe, na fig. 17-9-a, como se representa a ligação à Terra em diagramas elétricos). Nestas condições, os elétrons que estão em excesso no corpo metálico escoarão para a Terra através do condutor, fazendo com que aquele corpo perca sua carga negativa, passando ao estado neutro.

Na fig. 17-9-b mostramos o que aconteceria se o corpo metálico estivesse eletrizado positivamente: elétrons livres da Terra passariam através do condutor até que a carga positiva do corpo metálico fosse neutralizada. Vemos portanto que, em ambos os casos, o corpo metálico eletrizado, ao ser ligado à Terra por meio de um condutor, perde sua carga, tornando-se neutro.

2) Na fig. 17-9 (a e b), se em lugar do fio condutor fosse usado um fio isolante (de plástico, por exemplo) para estabelecer a ligação com a Terra, não haveria, como você já sabe, movimento de elétrons através deste fio. Desta maneira, o corpo metálico não se descarregaria, permanecendo eletrizado.

3) Ainda na fig. 17-9, se o suporte isolante que sustenta o corpo metálico fosse de vidro, este corpo poderia se descarregar mesmo que não estivesse ligado à Terra pelo fio condutor. Isto ocorre porque, geralmente, uma camada de vapor de água se forma sobre a superfície do vidro. Esta camada, sendo condutora, estabelece o contato elétrico do corpo metálico com a Terra e, por isto, ele se descarrega.

De maneira geral, em climas úmidos (como o de nosso país), um corpo metálico eletrizado, mesmo apoiado por isolantes, acaba se descarregando depois de um certo tempo. Embora o ar atmosférico seja isolante, a presença de umidade faz com que ele se torne condutor. Assim, o corpo eletrizado perde sua carga para a Terra através do ar.

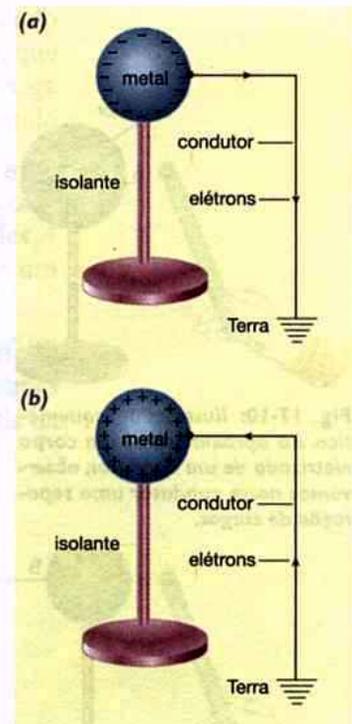


Fig. 17-9: Ilustração esquemática. Um corpo eletrizado, ao ser ligado à Terra por meio de um condutor, perde sua carga, tornando-se neutro.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

6. Sabe-se que o corpo humano é capaz de conduzir cargas elétricas. Explique, então, por que uma pessoa, segurando uma barra metálica em suas mãos, não consegue eletrizá-la por atrito.
7. Um ônibus, em movimento, adquire carga elétrica em virtude do atrito com o ar.
 - a) Se o clima estiver seco, o ônibus permanecerá eletrizado? Explique.
 - b) Ao segurar neste ônibus para subir nele, uma pessoa tomará um choque. Por quê?
 - c) Este fato não é comum em nosso clima. Por quê?
8. Para evitar a formação de centelhas elétricas, os caminhões transportadores de gasolina costumam andar com uma corrente metálica arrastando-se pelo chão. Explique.
9. Nas indústrias de tecido e papel, estes materiais estão em constante atrito com as peças das máquinas destas indústrias. Para evitar incêndios, o ar ambiente é constantemente umedecido. Qual a razão deste procedimento?

17.3. Indução e polarização

O QUE É INDUÇÃO ELETROSTÁTICA

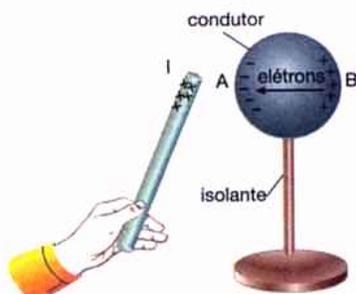


Fig. 17-10: Ilustração esquemática. Ao aproximarmos um corpo eletrizado de um condutor, observamos neste condutor uma separação de cargas.

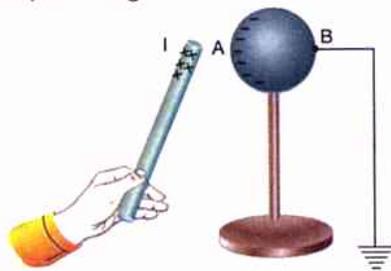


Fig. 17-11: Ilustração esquemática. Ao ser ligado à Terra, o condutor que sofreu indução fica eletrizado negativamente porque elétrons livres da Terra passam para ele.

Consideremos um condutor AB , no estado neutro (não eletrizado), apoiado em um suporte isolante. Aproximemos do condutor, sem tocá-lo, um corpo, I , eletrizado positivamente (fig. 17-10). Os elétrons livres, existentes em grande quantidade no condutor, são atraídos pela carga positiva do corpo I , acumulando-se na extremidade A . Como consequência deste deslocamento das cargas negativas para A , a extremidade B apresentará um excesso de cargas positivas, como mostra a fig. 17-10.

Observe que a aproximação do corpo carregado provocou, no condutor, uma separação de cargas, embora, como um todo, ele continue neutro (sua carga total é nula). Esta separação de cargas em um condutor, provocada pela aproximação de um corpo eletrizado, é denominada *indução eletrostática*. O corpo I que provocou a indução é denominado *indutor* e as cargas que aparecem nas extremidades do condutor são denominadas *cargas induzidas*.

ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO

Suponha que, mantendo o indutor fixo em sua posição, liguemos à Terra, por meio de um fio metálico, o condutor que sofreu a indução eletrostática (fig. 17-11). Esta ligação fará com que elétrons livres passem da Terra para o condutor, de maneira semelhante ao que está mostrado na fig. 17-9-b. Estes elétrons neutralizarão a carga positiva induzida localizada na extremidade B do condutor (fig. 17-11).

Se desfizemos a ligação com a Terra e, em seguida, afastarmos o indutor, a carga negativa induzida, que estava localizada na extremidade *A*, se distribuirá pela superfície do condutor, como mostra a fig. 17-12. Observe, então, que o condutor adquiriu uma carga negativa, isto é, uma carga de sinal contrário ao da carga do indutor. Este, por sua vez, não perdeu nem recebeu carga durante o processo. Esta maneira de eletrizar um condutor é denominada *eletrização por indução*.

POLARIZAÇÃO DE UM ISOLANTE

Como você já deve ter estudado em seu curso de Química, algumas substâncias (como a água, por exemplo) apresentam moléculas denominadas *moléculas polares*. Nestas moléculas, o centro das cargas positivas não coincide com o centro das cargas negativas havendo, portanto, uma assimetria na distribuição de cargas na molécula, como procuramos ilustrar na fig. 17-13-a. As substâncias cujas moléculas possuem as cargas elétricas distribuídas simetricamente são denominadas *apolares* (fig. 17-13-b).

Consideremos um dielétrico *AB*, não eletrizado, cujas moléculas são polares, afastado de influências elétricas externas. Nestas condições, as moléculas desta substância estão distribuídas ao acaso, como está representado na fig. 17-14-a. Aproximando-se deste dielétrico um corpo eletrizado (por exemplo, com carga positiva), a carga deste corpo atuará sobre as moléculas do isolante, fazendo com que elas se orientem, alinhando-se da maneira mostrada na fig. 17-14-b. Quando isto ocorre, dizemos que o dielétrico está *polarizado*. Observe, na fig. 17-14-b, que o efeito final desta *polarização* é fazer aparecer, na extremidade *A*, uma carga negativa e, na extremidade *B*, uma carga positiva. A fig. 17-14-c está representando este efeito final da *polarização*.

Devemos notar que, embora a carga total no dielétrico seja nula, a polarização faz aparecer cargas elétricas de sinais contrários nas extremidades *A* e *B*, de maneira semelhante ao que ocorria na indução eletrostática de um condutor.

Se o dielétrico *AB* fosse constituído por moléculas apolares, o mesmo efeito final seria observado, pois, com a aproximação do corpo eletrizado, as moléculas se tornariam polares e conseqüentemente se alinhariam da maneira mostrada na fig. 17-14-b.

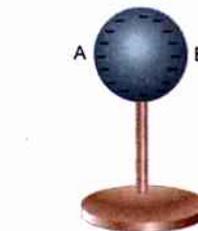
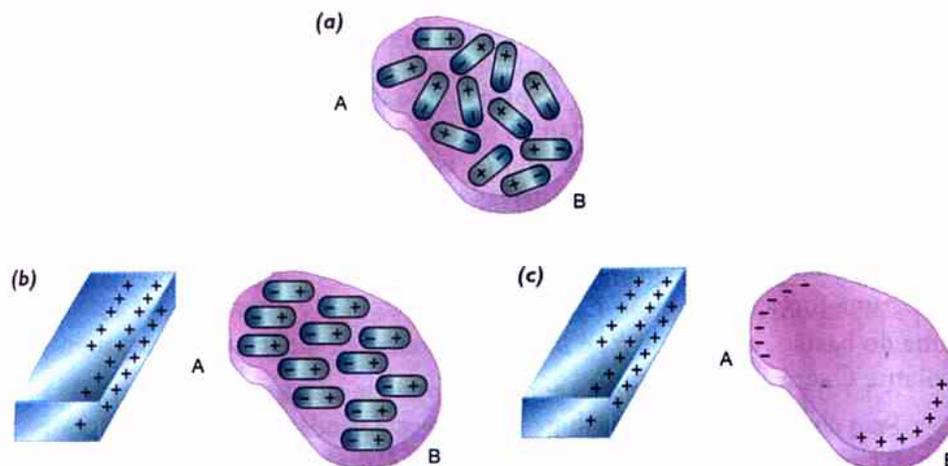


Fig. 17-12: Ilustração esquemática. A carga negativa, induzida no condutor, distribui-se pela sua superfície.

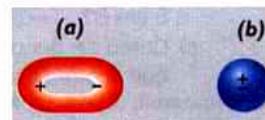


Fig. 17-13: Esquema de molécula polar (a) e molécula apolar (b).

Fig. 17-14: Ilustração esquemática. A polarização no dielétrico faz aparecer cargas de sinais contrários em suas extremidades.

exercícios de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

10. Uma barra eletrizada negativamente é colocada próxima de um corpo metálico AB (não eletrizado), como mostra a figura deste exercício.
- Para onde se deslocam os elétrons livres deste corpo metálico?
 - Então, qual o sinal da carga que aparece em A ? E em B ?
 - Como se denomina esta separação de cargas que ocorreu no corpo metálico?



Exercício 10.

11. Suponha, agora, que o corpo AB do exercício anterior seja um dielétrico.
- Haverá movimento de elétrons livres no corpo AB ?
 - Descreva o que se passa com as moléculas deste dielétrico (faça um desenho ilustrando sua resposta).

- Então, qual o sinal da carga elétrica que aparece na extremidade A do isolante? E em B ?
- Como se denomina este fenômeno que ocorreu no dielétrico AB ?

12. Considere novamente o corpo metálico mostrado na figura do exercício 10. Suponha que a extremidade B deste corpo seja ligada à Terra por meio de um fio condutor.

- Descreva o movimento de cargas que ocorrerá em virtude desta ligação.
- Desfazendo-se a ligação de AB com a Terra e afastando-se o indutor, o corpo metálico ficará eletrizado? Qual o sinal de sua carga?

13. Na fig. 17-11, suponha que afastássemos o indutor do condutor antes de desfazermos sua ligação com a Terra.

- O que ocorreria com os elétrons em excesso no condutor AB ?
- O condutor AB ficaria eletrizado positivamente, negativamente ou ficaria neutro?

17.4. Eletroscópios

POR QUE UM CORPO NEUTRO É ATRAÍDO POR UM CORPO ELETRIZADO

Vimos que um dos primeiros fenômenos elétricos observados consistia na atração de um corpo eletrizado (âmbar atritado) sobre corpos leves *não eletrizados* (pedaços de papel, por exemplo).

Poderemos entender por que isto ocorre analisando a fig. 17-15. Nesta figura, um bastão eletrizado, B , é aproximado de um pequeno corpo isolante, C , não eletrizado. Como estudamos na seção anterior, a presença da carga em B provoca polarização do corpo C , isto é, em extremidades opostas do dielétrico C aparecem cargas positivas e negativas, da maneira mostrada na fig. 17-15-a. Assim, haverá entre o bastão B e a extremidade negativa de C uma força de atração, representada por \vec{F}_1 , e entre B e a extremidade positiva de C , uma força de repulsão \vec{F}_2 . Como a extremidade negativa está mais próxima do bastão, o valor de \vec{F}_1 é maior do que o de \vec{F}_2 e, conseqüentemente, o isolante C será atraído para B .

Se o corpo C não for muito pesado, ele se deslocará, entrando em contato com o bastão B . Quando isto ocorrer, o corpo C poderá perder sua carga nega-

tiva para o bastão, neutralizando parte da carga positiva de B . Nestas condições, os corpos B e C possuirão cargas de mesmo sinal e, então, o dielétrico C será repellido pelo bastão B (fig. 17-15-b).

Uma análise semelhante nos permite concluir que, se o bastão B estiver eletrizado negativamente, o corpo C será, da mesma forma, atraído por ele, podendo ainda ser repellido após entrar em contato com o bastão.

Se o corpo C fosse condutor (um pequeno pedaço de metal, por exemplo), os mesmos fenômenos seriam observados. Deve-se apenas salientar que a separação de cargas mostrada na fig. 17-15-a seria, neste caso, provocada por indução eletrostática (movimento de elétrons livres) e não por polarização (como acontece com o isolante).

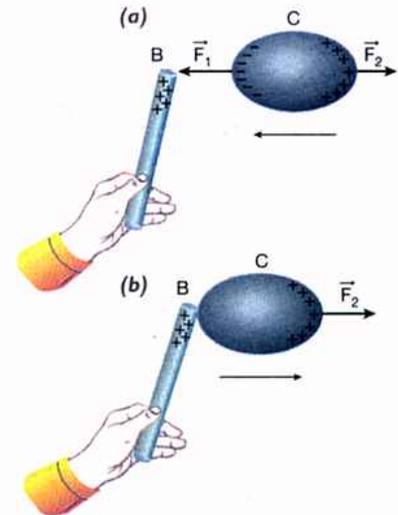


Fig. 17-15: Ilustração esquemática. Quando um corpo eletrizado é aproximado de um pequeno corpo isolante (um pedaço de papel, por exemplo), este se polariza e é atraído pelo corpo eletrizado.

O QUE É ELETROSCÓPIO

O eletroscópio é um dispositivo que nos permite verificar se um corpo está eletrizado. Um eletroscópio muito simples é constituído por um pequeno corpo leve (uma bolinha de isopor, por exemplo) suspenso na extremidade de um fio. Este eletroscópio costuma ser denominado *pêndulo elétrico*.

Aproximando-se do eletroscópio um corpo eletrizado, quer este corpo esteja carregado positiva ou negativamente, ele atrairá a bolinha suspensa (fig. 17-16), como acabamos de estudar. Portanto, o fato de a bolinha ser atraída pelo corpo nos informa que este corpo está eletrizado, embora não possamos determinar qual é o sinal de sua carga elétrica.

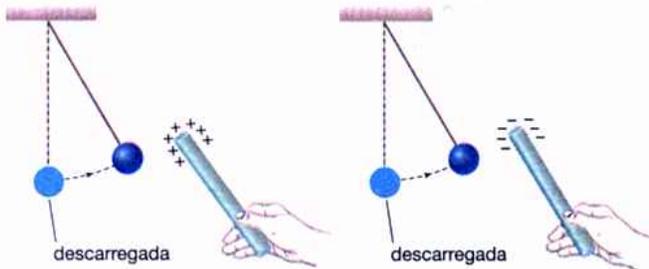


Fig. 17-16: Ilustração esquemática. Um eletroscópio simples é constituído por uma pequena esfera leve, suspensa por um fio isolante.

Para que pudéssemos determinar, com este eletroscópio, o sinal da carga de um corpo, seria necessário que a bolinha estivesse eletrizada com uma carga de sinal conhecido. Por exemplo: se a bolinha estiver eletrizada positivamente e for repelida por um certo corpo, podemos concluir que este corpo está eletrizado também positivamente, mas, se ela for atraída, o corpo estará carregado negativamente.

ELETROSCÓPIO DE FOLHAS

Outro tipo de eletroscópio muito comum é aquele denominado *eletroscópio de folhas*. Este aparelho consiste essencialmente de uma haste condutora tendo, em sua extremidade superior, uma esfera metálica e, na extremidade inferior, duas folhas metálicas leves, sustentadas de modo que possam se abrir e se fechar livremente (fig. 17-17).

Este conjunto costuma ser envolvido por uma caixa protetora (totalmente de vidro, ou metálica com janelas de vidro), apoiando-se nela por meio de um isolante (veja a fig. 17-17).

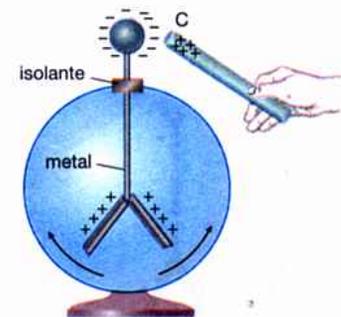
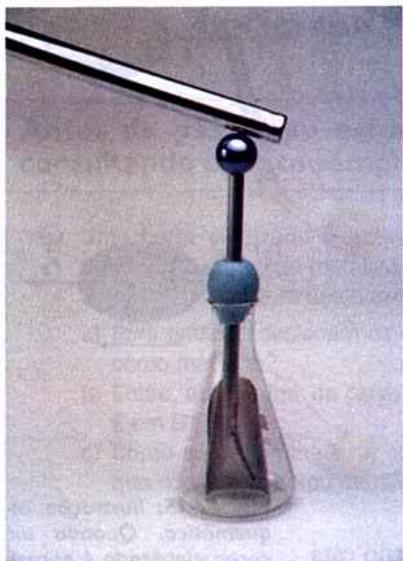


Fig. 17-17: Esquema de eletroscópio de folhas.



Eletroscópio feito com um frasco de vidro, uma rolha de borracha, uma barra metálica e duas finas folhas metálicas.

SérgioQuim/SOI Studios

Aproximando-se da esfera do eletroscópio (sem tocá-la) um corpo C eletrizado positivamente, haverá indução eletrostática na parte metálica do aparelho: os elétrons livres serão atraídos para a esfera, fazendo aparecer nas folhas um excesso de cargas positivas. As duas folhas, estando eletrizadas com cargas de mesmo sinal, se abrem em virtude da força de repulsão entre elas. Portanto, a abertura das folhas do eletroscópio, quando aproximamos um corpo de sua esfera, nos indica que este corpo está eletrizado. É fácil perceber que, ao afastarmos o corpo C , os elétrons da esfera serão atraídos para as folhas, neutralizando a carga positiva aí existente e fazendo com que elas se fechem.

Se o corpo C estivesse eletrizado negativamente observaríamos, da mesma forma, uma indução eletrostática no eletroscópio e, conseqüentemente, as folhas também se abririam (ambas, agora, eletrizadas negativamente). Então, o fato de as folhas se abrirem indica apenas que o corpo C está eletrizado, mas não nos permite determinar o sinal da carga neste corpo. Para que isto seja possível, é preciso que o eletroscópio esteja previamente eletrizado com uma carga de sinal conhecido, como veremos a seguir.

COMENTÁRIOS

Podemos eletrizar um eletroscópio de duas maneiras: por indução eletrostática e por contato com um corpo eletrizado.

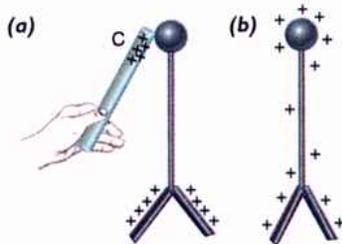


Fig. 17-18: Ilustração esquemática. Quando um corpo eletrizado positivamente é encostado na esfera do eletroscópio, ele também fica eletrizado positivamente.

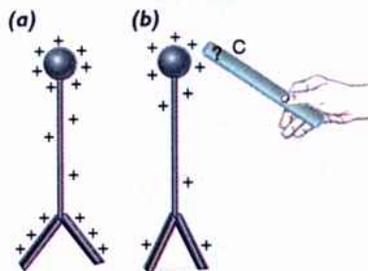


Fig. 17-19: Ilustração esquemática. É possível determinar o sinal da carga de um corpo aproximando-o de um eletroscópio carregado.

- 1) Para eletrizar o eletroscópio por indução, devemos proceder da maneira descrita na secção 17.3: um corpo eletrizado é aproximado da esfera, em seguida o eletroscópio é ligado à Terra e, finalmente, sendo desfeita esta ligação e afastando o corpo indutor, o eletroscópio ficará eletrizado com uma carga de sinal contrário à deste indutor.
- 2) A eletrização por contato é obtida encostando-se um corpo eletrizado na esfera do eletroscópio. Por exemplo: se o corpo C da fig. 17-17 for encostado na esfera, os elétrons aí presentes serão transferidos para C , neutralizando parte da carga positiva deste corpo (fig. 17-18-a). Como o eletroscópio perdeu elétrons, ele ficará eletrizado positivamente. Afastando-se o corpo C , verifica-se que a carga positiva, que estava localizada nas folhas, se distribui pelo eletroscópio (como veremos no capítulo seguinte). Observe, então, que o eletroscópio fica eletrizado com carga de sinal igual à do corpo com o qual entrou em contato e, conseqüentemente, suas folhas apresentam uma certa abertura (fig. 17-18-b).
- 3) Vejamos, agora, como podemos usar um eletroscópio carregado com carga de sinal conhecido para determinar qual é o sinal da carga existente em um corpo eletrizado. Suponha um eletroscópio carregado positivamente, como mostra a fig. 17-19-a. Se, ao aproximarmos um corpo C da esfera do eletroscópio, observamos que as folhas (que estavam abertas) se aproximam, podemos concluir que a carga do corpo C é negativa. De fato, sendo negativa a carga de C , elétrons livres da esfera serão repelidos e se deslocarão para as folhas. Estes elétrons neutralizarão parte da carga positiva aí existen-

te e, por isto, o afastamento entre as folhas diminui (fig. 17-19-b). Com raciocínio análogo podemos concluir que, se o afastamento das folhas for aumentado pela aproximação do corpo C , o sinal da carga neste corpo será positivo.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

14. Suponha que, na fig. 17-15, o bastão B estivesse eletrizado negativamente.
 - a) Faça um desenho mostrando as cargas que aparecem nas extremidades do corpo C em virtude da aproximação do bastão eletrizado negativamente.
 - b) Qual a extremidade de C que será atraída por B ? Qual será repelida?
 - c) O corpo C é atraído para B ? Por quê?
 - d) Descreva o que ocorre com o corpo C após tocar o bastão B .
15. Um corpo eletrizado com carga positiva é aproximado da bolinha de um pêndulo elétrico (eletroscópio).
 - a) Se a bolinha for atraída pelo corpo, podemos concluir que ela está eletrizada negativamente?
 - b) Se a bolinha for repelida, podemos concluir que ela possui carga positiva?
16. Na fig. 17-17, suponha que o corpo C estivesse eletrizado negativamente.
 - a) Qual o sinal da carga que apareceria na esfera do eletroscópio? E em suas folhas?
 - b) As folhas do eletroscópio se abririam?
 - c) Descreva a transferência de cargas que ocorreria se o corpo C encostasse na esfera.
 - d) Afastando-se o corpo C , qual seria o sinal da carga que ficaria distribuída no eletroscópio?
17. Um eletroscópio de folhas encontra-se eletrizado negativamente. Aproximamos da esfera deste eletroscópio um bastão eletrizado B .
 - a) Se verificarmos que as folhas do eletroscópio têm sua separação aumentada, qual é o sinal da carga no bastão B ? Explique.
 - b) Se a carga de B fosse positiva, o que ocorreria com a separação entre as folhas do eletroscópio? Por quê?

17.5. Lei de Coulomb

MEDIDA DA CARGA ELÉTRICA

Já sabemos que quando um corpo está eletrizado, ele possui um excesso de prótons (carga positiva) ou um excesso de elétrons (carga negativa). Por este motivo, o *valor da carga* de um corpo, que vamos representar por Q ou q , pode ser medido pelo número de elétrons que o corpo perdeu ou ganhou. Entretanto, esta maneira de expressar o valor da carga não é prática pois sabe-se que, em um processo comum de eletrização (atrato, por exemplo), o corpo perde ou ganha um número muito elevado de elétrons. Assim, os valores de Q ou q seriam expressos por números extremamente grandes.

Na prática, procura-se então usar uma unidade de carga que seja mais apropriada. No Sistema Internacional (S.I.) a unidade de carga elétrica é denominada *1 Coulomb* = 1 C, em homenagem ao físico francês Charles Coulomb. Este cientista, analisando as forças de interação entre cargas elétricas, chegou a uma importante lei, que estudaremos nesta seção.

Quando dizemos que um corpo possui uma carga de 1 C, isto significa que este corpo perdeu ou ganhou $6,25 \times 10^{18}$ elétrons, isto é:

*1 C corresponde a $6,25 \times 10^{18}$ elétrons em excesso
(se a carga do corpo for negativa)
ou em falta (se a carga do corpo for positiva).*

ADS



Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)

Nasceu em Angoulême, na França, e é conhecido principalmente pela formulação da lei que traz o seu nome. Como engenheiro militar, Coulomb trabalhou durante nove anos na Índia. Retornando à França, dedicou-se às pesquisas científicas, tendo inventado a balança de Coulomb, dispositivo que lhe permitiu medir as forças elétricas com enorme precisão, levando-o a estabelecer sua célebre lei. Coulomb desenvolveu pesquisas também em outros campos: sobre o atrito nas máquinas, elasticidade dos metais, fibras de seda etc. A unidade de carga elétrica no Sistema Internacional recebeu o nome de Coulomb em sua homenagem.

Na Eletrostática, geralmente lidamos com cargas elétricas muito menores do que 1 C. Neste caso, é costume expressar os valores das cargas dos corpos eletrizados em mC ($1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C}$) ou em μC ($1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$).



Fig. 17-20: Esquema representativo de força de atração entre duas cargas puntuais, de sinais contrários, separadas pela distância r .

A FORÇA ELÉTRICA É PROPORCIONAL ÀS CARGAS

Consideremos dois corpos eletrizados com cargas Q_1 e Q_2 , separados de uma distância r , como mostra a fig. 17-20.

Vamos supor que o tamanho destes corpos eletrizados seja muito pequeno em relação à distância r entre eles. Nestas condições, consideramos as dimensões destes corpos desprezíveis e nos referimos a eles como *cargas puntuais*. Portanto

uma carga puntual é aquela que está distribuída em um corpo cujas dimensões são desprezíveis em comparação com as demais dimensões envolvidas no problema.

No século XVIII, Coulomb realizou uma série de medidas cuidadosas das forças entre duas cargas puntuais, usando uma balança de torção semelhante àquela usada por Cavendish para comprovar a lei de Gravitação Universal (descrita no capítulo 6). Através destas medidas, Coulomb chegou a algumas conclusões (válidas tanto para forças de atração quanto de repulsão) que analisaremos a seguir.

Na fig. 17-20, designamos por F o módulo da força entre as cargas Q_1 e Q_2 . Coulomb verificou que, se a carga Q_1 for duplicada (ou triplicada, ou quadruplicada etc.), o valor da força entre as cargas também duplicará (ou triplicará, ou quadruplicará etc.), como está mostrado na fig. 17-21-a. Então, ele concluiu que o valor da força é proporcional à carga Q_1 isto é,

$$F \propto Q_1$$

Como era de esperar, se o valor de Q_1 não fosse alterado e o valor de Q_2 fosse duplicado (ou triplicado etc.), o módulo da força também duplicaria (ou triplicaria etc.), como está representado na fig. 17-21-b. Então, podemos escrever que também se tem

$$F \propto Q_2$$

Logo, como $F \propto Q_1$ e $F \propto Q_2$, vem $F \propto Q_1 Q_2$

ou seja

a força de interação entre duas cargas elétricas pontuais é proporcional ao produto destas cargas.

Assim, supondo, por exemplo, que o valor de Q_1 fosse duplicado e o de Q_2 fosse triplicado, o valor da força entre estas cargas se tornaria 6 vezes maior (fig. 17-21-c).

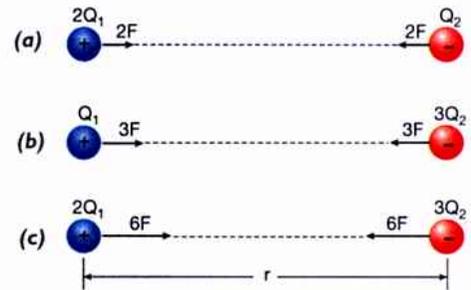


Fig. 17-21: Ilustração esquemática. A força de interação entre duas cargas pontuais, separadas por uma distância r , é diretamente proporcional ao produto destas cargas.

A FORÇA ELÉTRICA DEPENDE DA DISTÂNCIA ENTRE AS CARGAS

O fato de que a força entre corpos eletrizados diminui quando aumentamos a distância entre eles é conhecido há muitos séculos e já nos referimos a isso neste capítulo.

Entretanto, o estabelecimento da relação quantitativa entre a força F (que uma carga puntual exerce sobre outra) e r (distância entre as cargas) só veio a ser feito por Coulomb, em suas experiências com a balança de torção. Ele verificou que

duplicando $r \rightarrow F$ torna-se 4 vezes menor

triplicando $r \rightarrow F$ torna-se 9 vezes menor

quadruplicando $r \rightarrow F$ torna-se 16 vezes menor etc.

Assim, Coulomb observou que, quando a distância r é multiplicada por um número, a força F entre as cargas fica dividida pelo *quadrado* deste número. Portanto,

a força, F , de atração ou repulsão entre duas cargas pontuais é inversamente proporcional ao quadrado da distância, r , entre elas, isto é,

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

LEI DE COULOMB

Como já vimos que entre a força F e as cargas Q_1 e Q_2 existe a relação

$$F \propto Q_1 Q_2$$

e que entre esta mesma força e a distância r tem-se

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

podemos associar estas relações, obtendo

$$F \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Sabemos que esta relação poderá ser transformada em uma igualdade introduzindo-se nela uma constante de proporcionalidade adequada. Consideremos, inicialmente, as cargas Q_1 e Q_2 situadas no vácuo. Nesta situação, vamos designar por k_0 a constante de proporcionalidade a ser introduzida na relação anterior. Teremos, então, para as cargas no vácuo

$$F = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Chegamos, assim, à expressão matemática da lei de Coulomb, para o vácuo. O valor da constante k_0 pode ser obtido experimentalmente. No S. I., onde F é medido em newtons, Q_1 e Q_2 em coulombs e r em metros, o valor de k_0 é

$$k_0 = 9,0 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

INFLUÊNCIA DO MEIO

Suponhamos, agora, que as cargas Q_1 e Q_2 fossem colocadas no interior de um meio material qualquer (por exemplo, Q_1 e Q_2 poderiam estar mergulhadas em água, em óleo etc.). Verifica-se, neste caso, que a força de interação entre elas sofre uma redução, maior ou menor, dependendo do meio. Este fator de redução denomina-se *constante dielétrica do meio*, sendo representada por K .

Meio material	Constante dielétrica (K)
Vácuo	1,0000
Ar	1,0005
Benzeno	2,3
Âmbar	2,7
Vidro	4,5
Óleo	4,6
Mica	5,4
Glicerina	43
Água	81

Tabela 17-2.

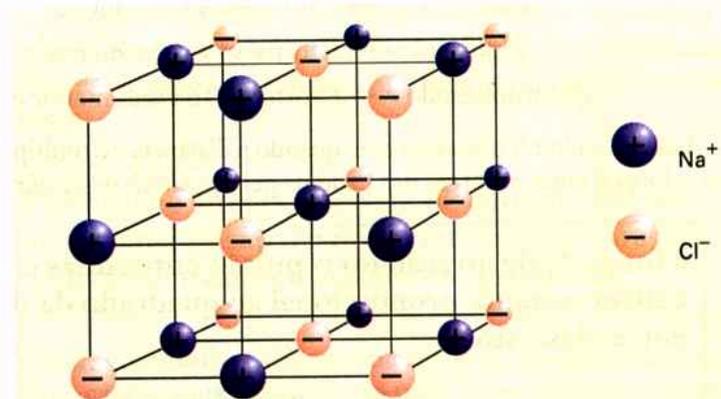


Ilustração esquemática. Em um cristal de cloreto de sódio, são as forças elétricas entre os íons Na^+ e Cl^- que mantêm a estrutura de sua rede cristalina. Quando esse sal é colocado em água, a força elétrica entre os íons torna-se muito fraca (80 vezes menor) e, por isso, a rede cristalina se desfaz. Então, a solução de NaCl em água é constituída por íons de Na^+ e Cl^- , distribuídos praticamente livres no seio do líquido. Toda substância, cujas ligações são do mesmo tipo que no cloreto de sódio, se dissolve facilmente na água, em virtude da grande redução causada por esse meio na força elétrica entre os íons (veja o problema 17 deste capítulo).

A tabela 17-2 apresenta os valores da constante dielétrica, K , para alguns meios materiais. Observando a tabela, podemos concluir que o valor da força entre duas cargas praticamente não se altera quando elas passam do vácuo

para o ar. Por outro lado, se elas forem mergulhadas em óleo, por exemplo, esta força torna-se 4,6 vezes menor e deve-se destacar o elevado valor da constante dielétrica da água: se mergulharmos Q_1 e Q_2 neste líquido, a força de interação entre elas enfraquece acentuadamente, tornando-se 81 vezes menor do que no vácuo.

Em resumo, podemos então apresentar a lei de Coulomb do seguinte modo:

Lei de Coulomb

Duas cargas puntuais, Q_1 e Q_2 , separadas por uma distância r , situadas no vácuo, se atraem ou se repelem com uma força F dada por

$$F = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ onde } k_0, \text{ no Sistema Internacional, tem o valor}$$

$$k_0 = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

Se estas cargas forem mergulhadas em um meio material, o valor das forças entre elas torna-se K vezes menor, onde K é a constante dielétrica deste meio.

Exemplo

Uma carga puntual positiva, $Q_1 = 0,23 \mu\text{C}$, é colocada a uma distância $r = 3,0 \text{ cm}$ de outra carga também puntual, negativa, $Q_2 = -0,60 \mu\text{C}$ (fig. 17-22).

a) Supondo que Q_1 e Q_2 estejam no ar, calcule o valor da força F_1 que Q_2 exerce sobre Q_1 .

Como a força entre duas cargas elétricas situadas no vácuo ou no ar é praticamente a mesma, o valor de \vec{F}_1 será dado por

$$F_1 = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

onde se tem, no Sistema Internacional:

$$k_0 = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

$$Q_1 = 0,23 \mu\text{C} = 2,3 \times 10^{-7} \text{ C}$$

$$Q_2 = -0,60 \mu\text{C} = -6,0 \times 10^{-7} \text{ C}$$

$$r = 3,0 \text{ cm} = 3,0 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Substituindo estes valores na expressão da lei de Coulomb, obteremos o valor de F_1 (não é necessário levar em conta o sinal das cargas, pois, como já sabemos qual é o sentido da força, desejamos calcular apenas o seu módulo).

Temos, então:

$$F_1 = 9,0 \times 10^9 \times \frac{(2,3 \times 10^{-7}) \times (6,0 \times 10^{-7})}{(3,0 \times 10^{-2})^2} \quad \text{onde} \quad F_1 = 1,38 \text{ N}$$

b) O valor da força \vec{F}_2 que Q_1 exerce sobre Q_2 é maior, menor ou igual ao valor de \vec{F}_1 ?

Pela 3ª lei de Newton sabemos que, se Q_2 atrai Q_1 , esta carga Q_1 atrairá a carga Q_2 com uma força igual e contrária. Em outras palavras, as forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 mostradas na fig. 17-22 constituem um par de ação e reação e, portanto, seus módulos são iguais, isto é, temos $F_2 = 1,38 \text{ N}$.

c) Se as cargas Q_1 e Q_2 estivessem mergulhadas em benzeno, qual seria o módulo da força de atração entre elas?

O módulo da força de atração tornar-se-ia, como sabemos, K vezes menor, sendo K a constante dielétrica do benzeno. Pela tabela 17-2 vemos que, neste caso, temos $K = 2,3$. Então, no interior do benzeno, Q_1 e Q_2 se atrairiam com uma força \vec{F} cujo módulo é

$$F = \frac{1,38 \text{ N}}{2,3} \quad \text{onde} \quad F = 0,60 \text{ N}$$

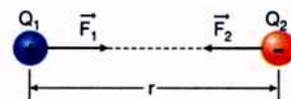


Fig. 17-22: Esquema para o exemplo da seção 17.5.

Interpretação microscópica da constante dielétrica de um meio

Acabamos de ver que a força elétrica entre duas cargas, colocadas no vácuo, sofre uma redução quando essas cargas são mergulhadas em um meio material. A constante dielétrica do meio, K , representa o fator de redução da força. Vamos apresentar, aqui, um modelo microscópico que nos permite entender por que se observa esta redução. Em outras palavras, vamos procurar interpretá-la analisando as alterações que ocorrem nos átomos ou moléculas do meio.

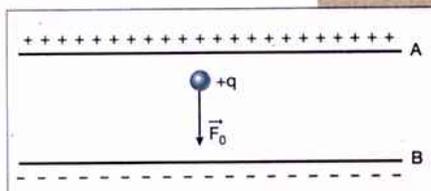


Figura I.

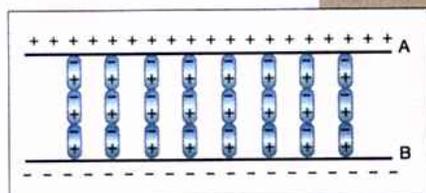


Figura II.

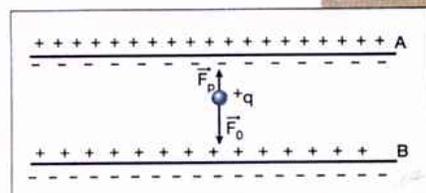


Figura III.

Tomemos duas placas metálicas A e B , situadas no vácuo, carregadas eletricamente com cargas iguais e de sinais contrários, como mostra a fig. I. Colocando-se uma carga q entre essas placas, uma força \vec{F}_0 atua sobre ela, em virtude das cargas nas placas.

Supondo, agora, que estas placas tenham sido mergulhadas em um meio dielétrico (como a água, por exemplo), já sabemos que este dielétrico ficará polarizado (como vimos na seção 17.3). As moléculas deste meio estarão, então, orientadas e alinhadas da maneira representada na fig. II. Em virtude desta polarização, as superfícies do dielétrico próximas às placas A e B ficarão eletrizadas, como está mostrado na fig. III. As cargas que aparecem nas superfícies do dielétrico são denominadas *cargas de polarização*.

Na fig. III pode-se perceber que a carga q , colocada entre as placas, ficará sob a ação de *duas forças*: a força \vec{F}_0 , devida às cargas nas placas A e B , e a força \vec{F}_p , de sentido contrário a \vec{F}_0 , devida às cargas de polarização. Então, a força elétrica \vec{F} que estará atuando sobre a carga q será a resultante de \vec{F}_0 e \vec{F}_p . Seu módulo será, evidentemente,

$$F = F_0 - F_p \quad \text{logo} \quad F < F_0$$

Portanto, a força elétrica, \vec{F} , sobre a carga q , é menor do que o valor F_0 no vácuo, em virtude do aparecimento das cargas de polarização que dão origem à força \vec{F}_p (de sentido sempre contrário a \vec{F}_0). Para qualquer dielétrico, verifica-se que o valor das cargas de polarização é sempre inferior ao valor das cargas responsáveis pela polarização (cargas nas placas). Conseqüentemente, tem-se $F_p < F_0$ e a força \vec{F} nunca se anulará. Além disso, quanto maior for o grau de orientação e alinhamento apresentado pelo dielétrico (maior polarização), maior será o valor de F_p e, portanto, menor será o valor de F .

Como a constante dielétrica é dada por $K = F_0/F$, pode-se concluir que K é uma característica do meio tal que, quanto maior for o seu valor, maior o grau de polarização que ele adquire na presença de cargas elétricas.

Em resumo, a constante dielétrica K mede uma característica microscópica de um meio material — sua propriedade de apresentar um maior ou menor grau de polarização.

Esta análise foi feita para a situação particular apresentada na fig. III. Entretanto, pode-se mostrar que é geral, aplicando-se a qualquer situação.

Por exemplo: na fig. IV, \vec{F}_0 representa a força com que duas cargas pontuais, Q_1 e Q_2 , se repelem no vácuo. Se estas cargas forem mergulhadas em um dielétrico, ele se polariza e as cargas de polarização darão origem à força \vec{F}_p , contrária a \vec{F}_0 , como mostra a figura. A força elétrica que atua em cada carga passa, então, a ter um valor $F < F_0$, dado por $F = F_0/K$.

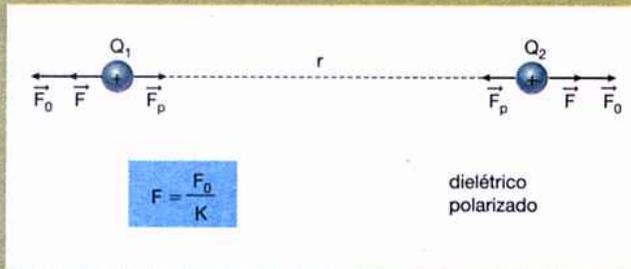
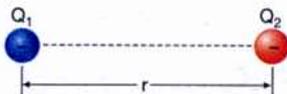


Figura IV.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

18. a) No texto desta seção foi fornecida a correspondência entre a carga de 1 C e o número de elétrons em excesso (ou em falta) em um corpo. Baseando-se nesta informação determine, em coulombs, o valor da carga de um elétron.
 - b) Usando a resposta da questão anterior, determine, em coulombs, o valor da carga Q em um corpo que possui $5,0 \times 10^{14}$ prótons em excesso. Expresse este valor também em μC .
 - c) Um pente eletrizado por atrito adquiriu uma carga negativa de $3,2 \times 10^{-10}$ C. O número de elétrons em excesso neste pente é maior ou menor do que a população do Brasil?
19. Duas cargas pontuais negativas, cujos módulos são $Q_1 = 4,3 \mu\text{C}$ e $Q_2 = 2,0 \mu\text{C}$, estão situadas no ar, separadas por uma distância $r = 30$ cm (veja a figura deste exercício).
 - a) Desenhe, em uma cópia da figura, a força que Q_1 exerce sobre Q_2 . Qual é o valor desta força?
 - b) Desenhe, agora, a força que Q_2 exerce sobre Q_1 . Qual é o valor desta força?
20. Suponha, no exercício anterior, que o valor da carga Q_1 tenha se tornado 10 vezes maior, que o valor de Q_2 tenha sido reduzido à metade e que a distância entre elas tenha se mantido constante.
 - a) Por qual fator ficaria multiplicado o valor da força entre as cargas?
 - b) Então, qual seria o novo valor desta força?
21. Considere, ainda, o exercício 19 e suponha que os valores de Q_1 e Q_2 tenham, agora, se mantido constantes.
 - a) Se a distância entre estas cargas se tornar 5 vezes maior, a força entre elas aumentará ou diminuirá? Quantas vezes?
 - b) Se a distância entre estas cargas for reduzida à metade, a força entre elas aumentará ou diminuirá? Quantas vezes?
22. Suponha, agora, que as cargas elétricas do exercício 19 tenham sido mergulhadas em glicerina, conservando os valores de Q_1 , Q_2 e r mencionados naquele exercício.
 - a) Neste caso, o valor da força entre as cargas aumentará ou diminuirá? Quantas vezes? (consulte a tabela 17-2)
 - b) Então, qual será o valor da força entre Q_1 e Q_2 quando estão mergulhadas na glicerina?



Exercício 19.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

17.6. As primeiras descobertas no campo da Eletricidade

FORÇA ELÉTRICA E FORÇA MAGNÉTICA

Como dissemos no início deste capítulo, o efeito âmbar, isto é, a propriedade de atrair corpos leves que o âmbar adquire ao ser atritado, já era conhecida há mais de 2 000 anos. Praticamente na mesma época observou-se também que certas pedras — os ímãs naturais — atraíam pedaços de ferro.

Durante muito tempo julgou-se que estes dois fenômenos eram de mesma natureza, ou seja, acreditou-se que ambos eram devidos a uma mesma propriedade dos corpos materiais. Ainda na Antiguidade, entretanto, percebeu-se uma grande diferença entre estes fenômenos: o âmbar atritado exercia sua atração sobre vários outros corpos, enquanto o ímã só atraía pedaços de ferro. Portanto, estas atrações não deviam ser confundidas entre si, pois correspondiam a fenômenos diferentes. Em nossa linguagem atual, esta verificação é traduzida dizendo-se que o âmbar atritado exerce uma *força elétrica* e o ímã exerce uma *força magnética*.

Vamos, a seguir, mostrar de maneira sucinta como evoluiu historicamente o estudo dos fenômenos relacionados com o *efeito âmbar*, isto é, o estudo dos fenômenos elétricos. Os fenômenos magnéticos serão analisados posteriormente, a partir do capítulo 22.

IDÉIAS INICIAIS SOBRE A ORIGEM DA FORÇA ELÉTRICA

Em todas as referências aos fenômenos elétricos feitas pelos filósofos da Antiguidade, encontramos sempre uma tentativa de explicação da origem das forças elétricas. Estas explicações apresentavam as mais diversas formas, sendo algumas teológicas e até mesmo psíquicas. Muitos filósofos atribuíam a atração a uma *simpatia* entre os corpos que se atraíam e outros acreditavam que os corpos atraídos serviam de alimentos para o âmbar.

Uma outra explicação das atrações elétricas, muito divulgada na Antiguidade, apresentava um caráter mecânico (ou material). Os defensores desta hipótese julgavam que o âmbar atritado emitia uma substância invisível, à qual denominavam *eflúvio*. Esta substância estabeleceria um contato material entre o âmbar e um objeto próximo, provocando sua atração.

Durante a Idade Média, predominou a antiga hipótese de que a atração era devida a uma simpatia entre os corpos. Entretanto, a impossibilidade de explicar vários fenômenos elétricos a partir desta idéia fez com que os cientistas do Renascimento (séculos XV e XVI) voltassem sua atenção para a hipótese material do eflúvio.

GILBERT PUBLICA O DE MAGNETE

No século XVI, o médico inglês W. Gilbert desenvolveu um estudo detalhado sobre os fenômenos elétricos e magnéticos publicando, em 1600, um

extenso tratado denominado *De magnete* (fig. 17-23), no qual apresentava os resultados de suas observações. Um dos capítulos desta obra era dedicado exclusivamente ao *efeito âmbar*.



Nesta tela, o médico inglês W. Gilbert realiza experiências de eletricidade perante a rainha da Inglaterra, Elizabeth I.

Gilbert conseguia detectar a existência de forças elétricas muito pequenas usando um aparelho que ele inventou e ao qual denominou *versorium*. Este aparelho consistia em uma seta de madeira suspensa em um suporte vertical em torno do qual ela podia girar livremente (fig. 17-24).

Se a seta girasse quando um corpo atritado era aproximado de sua extremidade, concluía-se que o corpo estava apresentando o *efeito âmbar* (estava eletrizado). Como o *versorium* era um aparelho muito sensível, Gilbert conseguiu verificar que um grande número de substâncias atritadas adquiria aquela propriedade, e não apenas o âmbar, como se acreditava até então. Ele descreve esta descoberta no *De magnete* da seguinte maneira:

“Pois não é apenas o âmbar, como eles supõem, que atrai pequenos corpos, mas também o diamante, a safira, a opala, a ametista, o cristal etc. Estas substâncias atraem todas as coisas, não somente penas e limalhas, mas todos os metais, madeira, pedra, terra e também a água e o azeite e tudo o que está sujeito a nossos sentidos e é sólido...”

Para explicar a atração exercida por todas aquelas substâncias, Gilbert adotou a hipótese do eflúvio, rejeitando veementemente a idéia da simpatia entre os corpos que se atraíam.

Apesar do grande número de cuidadosas experiências realizadas por Gilbert, ele não chegou a observar a existência da repulsão entre dois corpos eletrizados. Como sabemos, quando um corpo leve é atraído por um objeto atritado, após tocar este objeto o corpo é repelido por ele. Este fenômeno só foi observado, pela primeira vez, alguns anos após a morte de Gilbert, pelo jesuíta italiano Nicolo Cabeo. Em virtude desta descoberta, a teoria do eflúvio teve de sofrer modificações, pois ela não era capaz de explicar o fenômeno da repulsão elétrica.

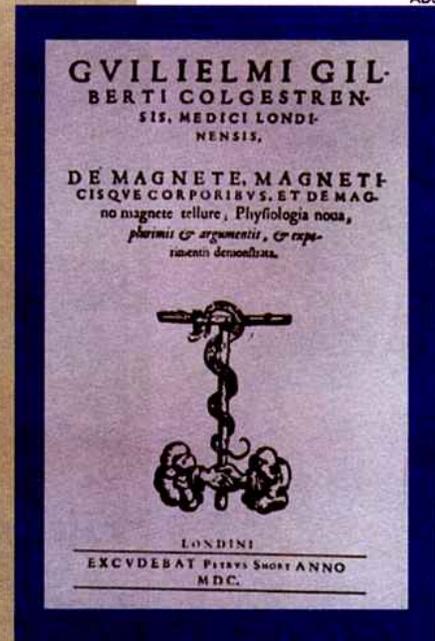


Fig. 17-23: Capa da célebre obra de Gilbert, *De magnete*, publicada em 1600.



Fig. 17-24: Ilustração esquemática do *versorium*, aparelho imaginado por Gilbert para detectar as forças elétricas.

CONDUTORES E ISOLANTES

Após a publicação dos trabalhos de Gilbert, durante todo o século XVII vários cientistas preocuparam-se em realizar experiências com corpos eletrizados, usando preferencialmente tubos e esferas de vidro, material este que se mostrou bastante adequado para este tipo de experiências. No início do século XVIII, alguns experimentadores perceberam que era possível eletrizar um corpo ligando-o, por meio de um fio, a um outro corpo que tivesse adquirido eletricidade por atrito. O cientista francês François Dufay, analisando estas experiências, concluiu que a intensidade da eletrização do corpo por meio da ligação dependia do material de que era feito o fio. Ele chegou, então, à conclusão de que certas substâncias *conduziam* bem a eletricidade, enquanto outras não o faziam. Desta maneira, estavam sendo estabelecidos os conceitos de *corpos condutores* e *corpos isolantes*, tais como os conhecemos atualmente.

EXISTEM DOIS TIPOS DE ELETRICIDADE

Prosseguindo com o estudo da repulsão elétrica, que Cabeo havia iniciado, Dufay procurou dar uma explicação para o fenômeno. Ele supunha que um corpo atraído por outro eletrizado era repelido depois de tocá-lo porque se tornava também eletrizado. Concluiu, então, que dois corpos eletrizados sempre se repelem. Entretanto, esta idéia inicial de Dufay teve de ser modificada, pois ele mesmo observou, mais tarde, que um pedaço de vidro atritado com seda atraía um pedaço de âmbar atritado com pele, isto é, dois corpos eletrizados podiam se atrair. Baseando-se em um grande número de experiências, Dufay lançou, então, as bases de uma nova hipótese que teve grande aceitação durante todo o século XVIII. Segundo ele, existiam dois tipos de eletricidade: eletricidade *vítrea*, aquela que aparece em um pedaço de vidro atritado com seda, e eletricidade *resinosa*, aquela que aparece no âmbar atritado com pele (o termo *resinosa* foi usado por ser o âmbar uma resina). Todos os corpos que possuíssem eletricidade vítrea (ou resinosa) repeliam uns aos outros. Por outro lado, corpos com eletricidade de nomes contrários atraíam-se mutuamente.

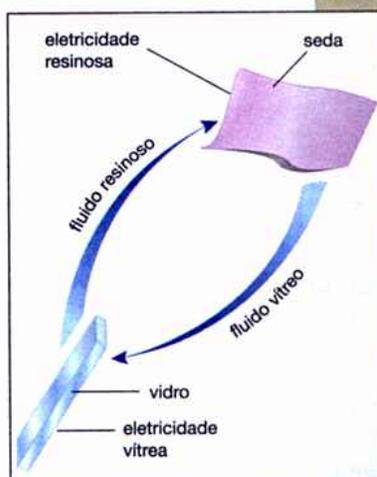


Fig. 17-25: De acordo com a teoria de Dufay, a eletrização de um corpo se fazia pela transferência, entre dois corpos, de dois fluidos: o fluido resinoso e o fluido vítreo.

A TEORIA DOS DOIS FLUIDOS ELÉTRICOS

Para explicar por que estes dois tipos de eletrização eram observados, lançou-se também a idéia da existência de dois fluidos elétricos: um *fluido vítreo* e um *fluido resinoso*. Em um corpo normal, não eletrizado, estes dois fluidos apresentavam-se misturados em igual quantidade. Ao atritar, por exemplo, o vidro com a seda, havia passagem, em igual quantidade, de fluido vítreo da seda para o vidro e de fluido resinoso do vidro para a seda (fig. 17-25).

Assim, o vidro apresentava-se com eletricidade vítrea porque passou a ter um excesso de fluido vítreo e a seda, que passou a ter um excesso de fluido resinoso, apresentava-se com eletricidade resinosa.

Portanto, de acordo com estas idéias, a eletricidade não era criada quando um corpo era atritado. Os fluidos elétricos já existiam nos corpos

e havia apenas uma redistribuição destes fluidos quando os corpos eram atritados. Esta teoria passou a ser conhecida com o nome de *teoria dos dois fluidos* e com ela era possível explicar todos os fenômenos elétricos conhecidos na época.

A TEORIA DO FLUIDO ÚNICO DE BENJAMIN FRANKLIN

No decorrer do século XVIII, as experiências com corpos eletrizados tornaram-se muito populares e eram realizadas em praças públicas, mesmo por pessoas leigas, apresentando resultados espetaculares que atraíam a atenção de um grande público. Foi ao assistir a um desses espetáculos que o cientista americano Benjamin Franklin se interessou pelo estudo dos fenômenos elétricos. Este cientista realizou um número muito grande de experiências que contribuíram significativamente para o desenvolvimento da eletricidade.

Uma importante contribuição de Franklin, apresentada na mesma época em que a teoria dos dois fluidos era amplamente divulgada na Europa, foi a formulação de uma outra hipótese, denominada *teoria do fluido único*. Conforme foi descrito na seção 17.1, de acordo com esta teoria os corpos não eletrizados possuíam uma quantidade *normal* de um certo fluido elétrico. Quando um corpo era atritado com outro, um deles perdia parte de seu fluido, que era transferida para o outro. Como Franklin não conhecia a terminologia usada por Dufay, ele criou sua própria nomenclatura, dizendo que o corpo que recebia o fluido elétrico ficava eletrizado *positivamente* e aquele que perdia o fluido ficava eletrizado *negativamente*. Esta terminologia, como sabemos, é usada até hoje e corresponde, respectivamente, aos termos *eletricidade vítrea* e *eletricidade resinosa*, usados por Dufay.

AS TEORIAS DOS FLUIDOS E AS IDÉIAS MODERNAS DE ELETRIZAÇÃO

Do mesmo modo que na teoria dos dois fluidos, a teoria de Franklin previa a *conservação da carga elétrica*, isto é, a eletricidade não é nem criada nem destruída no processo de eletrização: ela já existe nos corpos e simplesmente se redistribui entre eles quando são atritados. Estas duas teorias da eletrização mostraram-se igualmente satisfatórias para explicar os fenômenos elétricos conhecidos na época (século XVIII). Deste modo, não foi possível optar por uma delas e os cientistas usavam ora uma, ora outra, de acordo com suas conveniências.

É interessante observar que a teoria dos dois fluidos está mais próxima das idéias modernas no que se refere à constituição elétrica da matéria. De fato, sabemos atualmente que existem dois tipos de cargas elétricas nas partículas que constituem um corpo material. Entretanto, a teoria do fluido único de Franklin está mais de acordo com os conhecimentos atuais na explicação do processo de eletrização por atrito. Realmente, de acordo com as teorias modernas, apenas um tipo de carga elétrica transfere-se de um corpo para outro quando eles são atritados. Deve-se destacar, porém, que, segundo Franklin, a carga transferida durante o atrito era a carga positiva (pela transferência do fluido único), enquanto que, de acordo com as idéias modernas, são os elétrons que se transferem de um corpo para outro e sabemos que eles transportam carga negativa.

AS EXPERIÊNCIAS DE COULOMB COM A BALANÇA DE TORÇÃO

Até a época dos trabalhos de Franklin e Dufay (meados do século XVIII) apenas os aspectos qualitativos dos fenômenos elétricos tinham sido abordados. Os cientistas sentiam que, para o progresso dos estudos relacionados com a eletricidade, era necessário estabelecer relações *quantitativas* entre as grandezas envolvidas naqueles fenômenos.

Em particular, houve uma preocupação em relacionar quantitativamente a força elétrica, F , entre dois corpos, com a distância, r , entre eles. Percebendo que havia uma certa semelhança entre a atração elétrica e a atração gravitacional (cujo estudo já havia sido desenvolvido por Newton), alguns físicos, no final do século XVIII, lançaram a hipótese de que a força elétrica poderia, também, variar com o inverso do quadrado da distância entre os corpos, isto é, $F \propto 1/r^2$. Entretanto, era necessário que fossem realizadas medidas cuidadosas para verificar se esta hipótese era verdadeira.

Entre os diversos trabalhos que foram desenvolvidos pelos cientistas com este objetivo, destacam-se as experiências realizadas por Coulomb que, em 1785, apresentou à Academia de Ciências da França um relatório de seus trabalhos. Coulomb construiu um aparelho, denominado *balança de torção*, com o qual ele podia medir diretamente as forças de atração e repulsão entre corpos eletrizados. A fig. 17-26 apresenta uma cópia do desenho desta balança, feito pelo próprio Coulomb no relatório enviado à Academia de Ciências. Observe, no desenho, que duas esferas estão equilibradas nas extremidades de uma haste horizontal, suspensa por um fio. A esfera a está eletrizada e uma esfera b , também eletrizada, é aproximada de a . Em virtude da força elétrica que se manifesta entre a e b , a haste gira, provocando uma torção no fio. Medindo o ângulo de torção do fio, Coulomb conseguia determinar o valor da força entre as esferas. Uma balança semelhante a esta foi usada, aproximadamente na mesma época, por Cavendish, para comprovar a lei da Gravitação Universal e para medir o valor da constante de gravitação G , conforme descrevemos no capítulo 6. As balanças de torção permitem realizar medidas de alta precisão. Com sua balança, Coulomb conseguia medir forças de até 10^{-8} N!

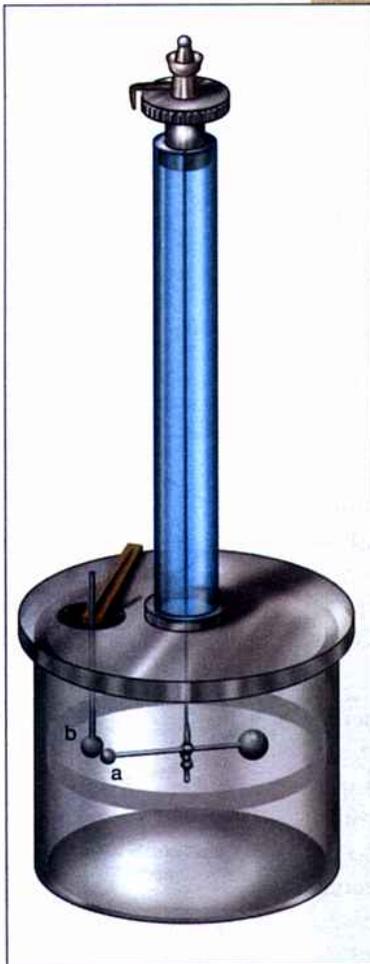


Fig. 17-26: Cópia do desenho da balança de Coulomb, feito pelo seu inventor.

OS RESULTADOS OBTIDOS POR COULOMB

Realizando medidas com as esferas separadas por diversas distâncias, Coulomb verificou que, realmente, a força elétrica era inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Além disso, como foi apresentado na seção 17.5, ele concluiu também que esta força era proporcional ao produto das cargas elétricas das esferas, chegando, assim, à expressão definitiva da lei que leva seu nome. Este fato se revestiu de grande importância, uma vez que a lei de Coulomb foi a primeira lei fundamental estabelecida no campo da Eletricidade. No decorrer dos séculos XIX e XX, um grande número de novos fenômenos elétricos foi estudado e novas leis foram estabelecidas, provocando um notável progresso desta área da ciência. Vários desses fenômenos e algumas destas leis, que são também fundamentais no estudo da Eletricidade, serão analisados nos capítulos seguintes deste volume.

os de fixação **exerCÍcios de fixação** exerCÍcios de fixaç

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

23. a) Qual a diferença de comportamento entre um bastão de âmbar atritado e um ímã, observada desde a Antiguidade?
 b) Que importante conclusão foi possível tirar desta observação?
24. a) Qual foi a importante contribuição do médico inglês W. Gilbert sobre o comportamento de diversas substâncias com relação ao fenômeno de eletrização? (leia o trecho do livro *De magnete*, reproduzido nesta seção)
 b) Gilbert não chegou a perceber uma importante propriedade dos corpos eletrizados. Qual é ela?
25. a) O cientista francês Dufay realizou diversas experiências, ligando, sucessivamente, um corpo eletrizado a outro não eletrizado, por meio de fios de materiais diferentes. Qual foi a importante conclusão que ele tirou dessas experiências?
 b) Após realizar um grande número de experiências nas quais ele observou que os corpos eletrizados, em geral, podem se atrair ou se repelir, Dufay lançou uma hipótese sobre a natureza da eletricidade. Qual foi, essencialmente, a idéia de Dufay?
26. Suponha que um bastão de âmbar seja atritado com um pedaço de pele. Usando a teoria dos dois fluidos, faça um diagrama semelhante ao da figura 17-25 mostrando o mecanismo de eletrização daqueles corpos.
27. a) Como foi denominada a teoria de eletrização dos corpos proposta por Benjamin Franklin?
 b) Qual a terminologia, usada por Franklin, correspondente às denominações *eletricidade vítrea* e *eletricidade resinosa*, usadas por Dufay?
- c) Como Franklin, com sua teoria, descrevia a eletrização por atrito?
28. Qual a importante propriedade das cargas elétricas, válida ainda nas teorias modernas, e que estava presente tanto na teoria dos dois fluidos quanto na teoria do fluido único?
29. Considere a teoria dos dois fluidos e a teoria do fluido único. Qual delas está mais próxima das teorias modernas, no que se refere:
 a) à constituição elétrica da matéria? Por quê?
 b) ao processo de eletrização por atrito?
 Explique.
30. Por que, mesmo antes das experiências de Coulomb, já se suspeitava que a força elétrica devia ser inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre as cargas?
31. Em que outra oportunidade, além da experiência de Coulomb, foi usada uma balança de torção para se obter importantes resultados no campo da Física?
32. Na balança de torção, construída por Coulomb, mostrada na figura 17-26, suponha que as duas pequenas esferas estivessem separadas por uma distância $r = 1$ cm. Diga se a sensibilidade desta balança (consulte o texto) permitiria medir as seguintes forças:
 a) Força de atração gravitacional entre as esferas, considerando a massa de cada uma igual a 10 g e tomando $G = 6 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.
 b) Força elétrica entre as esferas, considerando cada uma com uma carga de $0,001 \mu\text{C}$.

reVisão reVisão **reVisão** reVisão reVisão reVisão reVi

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

1. a) Onde e quando foram feitas as primeiras referências e observações de fenômenos elétricos? Descreva os fenômenos observados naquela época.
 b) Qual foi a principal contribuição de Gilbert para o estudo destes fenômenos?
 c) De onde se originaram os termos *eletrizar*, *eletricidade* etc.?

2. a) Quantos tipos de carga elétrica existem na natureza? Como se denominam?
b) Em que condições temos atração entre duas cargas elétricas? E em que condições elas se repelem?
3. a) Qual é a relação entre o número total de prótons e o número total de elétrons existentes em um corpo neutro?
b) Atritando dois corpos diferentes, inicialmente neutros, ambos se eletrizam?
c) Que partícula é transferida de um corpo para o outro no processo de eletrização por atrito?
d) Qual dos dois corpos ficará eletrizado positivamente? Qual deles ficará eletrizado negativamente?
4. a) O que é um *condutor* de eletricidade? Dê exemplos de substâncias condutoras.
b) O que é um *isolante* (ou dielétrico)? Dê exemplos de substâncias isolantes.
5. a) Descreva, com suas palavras, o fenômeno que está representado na fig. 17-9-a. Qual será a carga final no corpo metálico?
b) Faça o mesmo para a fig. 17-9-b.
6. a) Por que não é aconselhável usar o vidro como suporte isolante, apesar de ser ele um dielétrico?
b) Por que, em dias úmidos, um corpo eletrizado perde sua carga com relativa rapidez?
7. a) Descreva, com suas palavras, o processo de *indução eletrostática*.
b) Faça o mesmo para o processo de *polarização* de um dielétrico.
8. a) Como você procederia para eletrizar positivamente, por indução, uma barra metálica? Explique o que se passa em cada fase do processo.
b) E como você procederia para eletrizar a barra negativamente?
9. a) Explique por que um corpo leve, não eletrizado, é atraído por um bastão carregado.
b) Por que, após tocar o bastão, o corpo leve é repellido?
10. a) O que é um eletroscópio?
b) Descreva os dois tipos de eletroscópios apresentados neste capítulo.
11. a) Como usamos um eletroscópio de folhas para verificar se um corpo está eletrizado (descreva o que ocorre no eletroscópio)?
b) Descreva como este aparelho pode ser usado para se determinar o sinal da carga em um corpo.
12. a) O que se entende por *carga puntual*?
b) Escreva a expressão matemática da lei de Coulomb (no vácuo) explicando o significado de cada símbolo que nela aparece.
c) O que ocorre com o valor da força elétrica entre duas cargas, inicialmente no vácuo, quando elas são mergulhadas em um meio material?
d) O que é a *constante dielétrica* de um meio material?

algumas experiências simples

Para você fazer

Observação: Antes de iniciar as experiências seguintes, você deve verificar se os objetos que vão ser utilizados estão bem limpos e secos. Esta é uma condição necessária para que eles se eletrizem e conservem sua carga. Se você perceber que isto não está ocorrendo, procure limpar e secar os objetos colocando-os próximos de um dispositivo aquecido, como um forno ou uma lâmpada acesa. Além disso, em dias úmidos, para que as experiências possam dar bons resultados, elas devem ser realizadas no interior de uma caixa onde o grau de umidade tenha sido bastante reduzido. Pode-se conseguir este ambiente, próprio para experiências de eletrostática, mantendo-se uma lâmpada ou um secador ligado durante algum tempo no interior da caixa.

Primeira experiência

Tome um pente de plástico e, passando-o algumas vezes em seus cabelos (que devem estar limpos e secos), ele se eletrizará, como você já sabe.

1ª) Aproxime o pente de objetos leves, como pequenos pedaços de papel ou de isopor.

2ª) Deixe escorrer um filete de água de uma torneira e aproxime dela o pente eletrizado.

Observe o que acontece em ambos os casos. Os pedaços de papel e o filete de água estavam inicialmente eletrizados? Explique, então, por que eles foram atraídos pelo pente.

Segunda experiência

Usando papel de alumínio (papel de cigarro, por exemplo) faça uma pequena esfera e prenda-a na ex-

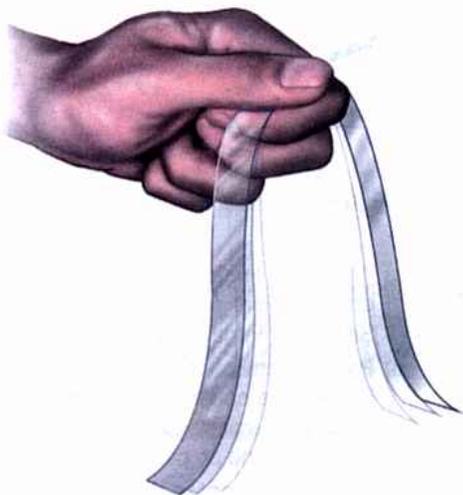
tremidade de um fio de linha de costura. Suspendendo a outra extremidade deste fio em um suporte isolante (no alto do batente de madeira de uma porta ou, melhor ainda, em uma placa de isopor) você obtém um eletroscópio simples que, como sabemos, é denominado *pêndulo elétrico*. Eletrizando um pente, da maneira descrita na experiência anterior, aproxime-o da bolinha do eletroscópio. Observe que a bolinha é, inicialmente, atraída pelo pente. Entretanto, após encostar nele, ela é repelida: verifique esta repulsão tentando aproximar o pente da bolinha.

Responda às questões seguintes:

- A bolinha estava inicialmente eletrizada? Então, por que ela é atraída pelo pente?
- Por que, após encostar no pente, a bolinha é repelida por ele?

Terceira experiência

Procure obter um pedaço de plástico leve, destes usados na fabricação de saquinhos para embalagem de roupas ou alimentos. Corte duas tiras deste plástico, cada uma com cerca de 5 cm de largura e 25 cm de comprimento.



Terceira experiência.

- Atrite estas tiras com um pedaço de lã ou com suas próprias mãos. Suspenda as tiras da maneira mostrada na figura desta experiência e observe que elas se repelem. Explique por quê.
- Introduza, entre as tiras, um pente atritado nos cabelos. Observe o que ocorre e explique.
- Introduza, agora, entre as tiras, um objeto qualquer (não eletrizado, como uma folha de papel, por exemplo). Explique o que você observou lembrando-se que o objeto introduzido entre as tiras sofre indução (ou polarização). Retire o objeto e veja o que acontece com as tiras. Explique.

- 4ª) Estando as tiras eletrizadas e, portanto, afastadas uma da outra, aproxime delas uma chama qualquer (de um fósforo ou isqueiro). Você seria capaz de explicar por que as tiras se fecham rapidamente?

Quarta experiência

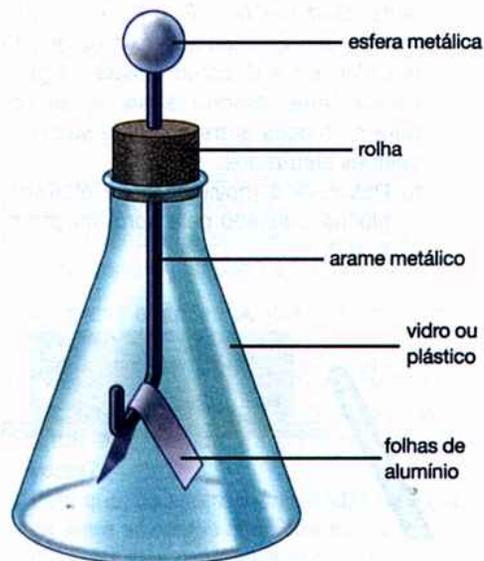
Ao usar uma roupa de náilon ou de outro tecido sintético, você já deve ter observado que este tecido se eletriza em virtude do atrito com o ar ou com nosso próprio corpo.

- 1ª) Em um quarto escuro, procure escutar os pequenos *estalos* e observar as pequenas centelhas que ocorrem quando tiramos a roupa feita com aqueles tecidos (estes estalos e centelhas ocorrem quando a carga elétrica do tecido *salta* da roupa para nosso corpo).
- 2ª) Se a sola de seu sapato for feita de material isolante (e o tempo estiver seco), a eletricidade desenvolvida pelo atrito de sua roupa se acumulará em seu próprio corpo. Nestas condições, ao tocar em um objeto metálico ligado ao solo (uma torneira, por exemplo) você poderá tomar um pequeno choque elétrico, causado pela passagem da eletricidade de seu corpo para a Terra. Tente observar este efeito.

Quinta experiência

Orientando-se pela descrição feita na seção 17.4 e pela figura desta experiência, procure construir um *eletroscópio de folhas*. Não se esqueça de limpar e secar bem todas as peças que constituem o aparelho.

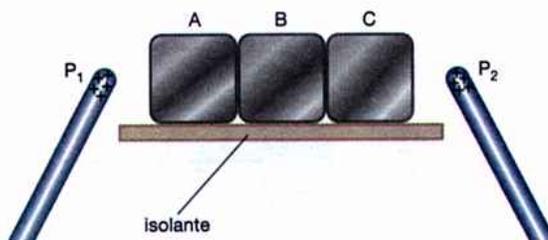
Usando o eletroscópio que você construiu, faça as experiências descritas na seção 17.4.



Quinta experiência.

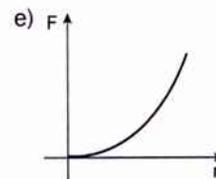
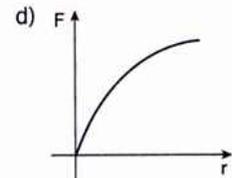
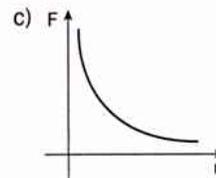
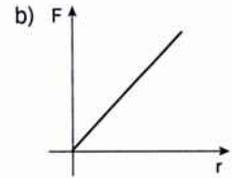
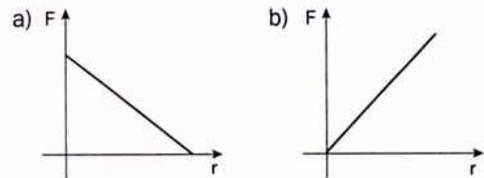
problemas e testes problemas e testes problemas

1. Considere um pequeno bloco de cobre, cuja massa é 127 g. Suponha que, em cada átomo de Cu, um elétron não esteja ligado ao núcleo, isto é, tem-se um elétron livre por átomo desta substância.
 - a) Quantos gramas de Cu constituem um átomo-grama desta substância (consulte seu livro-texto de Química)?
 - b) Então, quantos átomos de Cu existem no bloco citado (considere o número de Avogadro igual a 6×10^{23})?
 - c) Portanto, qual é o número de elétrons livres no bloco?
2. Sejam \vec{F}_1 e \vec{F}_2 as forças de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas. É correto afirmar que os sentidos das forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 :
 - a) Serão opostos somente quando as cargas tiverem sinais opostos.
 - b) Serão iguais somente quando as cargas tiverem sinais iguais.
 - c) Serão opostos somente quando as cargas tiverem sinais iguais.
 - d) Serão iguais somente quando as cargas tiverem sinais opostos.
 - e) Serão sempre opostos, quaisquer que sejam os sinais das cargas.
3. Considere quatro objetos eletrizados, A, B, C e D. Verifica-se que A repele B e atrai C. Por sua vez, C repele D. Sabendo-se que D está eletrizado positivamente, qual é o sinal da carga de B?
4. Três blocos metálicos, A, B e C, encontram-se em contato, apoiados sobre uma mesa de material isolante. Dois bastões, P_1 e P_2 , eletrizados positivamente, são colocados próximos às extremidades dos blocos A e C, como mostra a figura deste problema. Uma pessoa (usando luvas isolantes) separa os blocos entre si e, em seguida, afasta os bastões eletrizados.
 - a) Descreva o movimento de elétrons livres nos blocos, causado pela aproximação dos bastões P_1 e P_2 .



Problema 4.

- b) Diga qual é o sinal da carga de cada bloco após serem separados.
5. Seja F o módulo da força entre duas cargas pontuais, separadas de uma distância r . Entre os gráficos mostrados na figura deste problema, assinale aquele que melhor representa a relação entre F e r .



Problema 5.

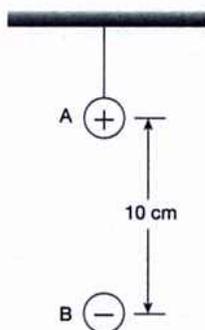
6.
 - a) Usando a lei de Coulomb, determine a unidade em que deve ser expressa a constante k_0 , no Sistema Internacional.
 - b) Para se certificar de que 1 C corresponde a uma unidade de carga muito grande, calcule a força entre duas cargas pontuais, de 1 C cada uma, separadas, no ar, pela distância de 1 m.
 - c) Qual seria a massa de um corpo cujo peso fosse igual à força calculada em (b) (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$)?
7. Duas cargas elétricas pontuais estão separadas por uma distância de $4,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ e se repelem com uma força de $27 \times 10^{-4} \text{ N}$. Suponha que a distância entre elas tenha sido aumentada para $12 \times 10^{-2} \text{ m}$.
 - a) Quantas vezes maior tornou-se a distância entre as cargas?
 - b) A força entre as cargas aumentou ou diminuiu? Quantas vezes?
 - c) Então, qual é o novo valor da força de repulsão entre as cargas?

8. Duas cargas elétricas pontuais estão separadas por uma distância de 15 cm. Altera-se a distância entre estas cargas até que a força elétrica entre elas se torne 25 vezes maior.
- A distância entre as cargas foi aumentada ou reduzida? Quantas vezes?
 - Então, qual é o novo valor da distância entre as duas cargas?
9. Duas cargas pontuais, Q_1 e Q_2 , estão se atraindo, no ar, com uma certa força \vec{F} . Suponha que o valor de Q_1 seja duplicado e o de Q_2 se torne 8 vezes maior. Para que o valor da força \vec{F} permaneça invariável, a distância r entre Q_1 e Q_2 deverá tornar-se:
- 32 vezes maior.
 - 4 vezes maior.
 - 16 vezes maior.
 - 4 vezes menor.
 - 16 vezes menor.
10. A figura deste problema mostra duas cargas pontuais, Q_1 e Q_2 , ambas positivas e tais que o módulo de Q_1 é maior do que o de Q_2 . Deseja-se colocar uma carga q , também puntual, na reta que passa por Q_1 e Q_2 , de tal modo que ela fique em equilíbrio. Para isto, a carga q deve ser colocada:
- À esquerda de Q_1 .
 - No ponto médio entre Q_1 e Q_2 .
 - Entre Q_1 e Q_2 e mais próxima de Q_1 .
 - Entre Q_1 e Q_2 e mais próxima de Q_2 .
 - À direita de Q_2 .



Problema 10.

11. No problema anterior, indique a alternativa que seria correta se Q_1 fosse positiva e Q_2 fosse negativa (considere, ainda, que o módulo de Q_1 é maior do que o de Q_2).

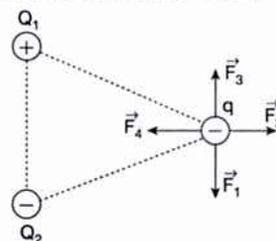


Problema 12.

12. Uma pequena esfera, A, eletrizada positivamente, está suspensa, no ar, em um suporte por meio de um fio isolante. Uma outra esfera, B, de massa igual a 10 g, com carga igual e oposta à da esfera

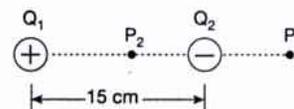
A, é colocada 10 cm abaixo desta, como mostra a figura deste problema. Nestas condições, verifica-se que B permanece em repouso ao ser abandonada.

- Qual é o valor da força elétrica com que A atrai B (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$)?
 - Qual é o módulo da carga existente em cada uma das esferas?
 - Qual é o número de elétrons em excesso na esfera B?
13. Três cargas elétricas, Q_1 , Q_2 e q , estão dispostas, como mostra a figura deste problema, nos vértices de um triângulo isósceles. Sabendo-se que os módulos das cargas Q_1 e Q_2 são iguais, indique, entre os vetores mostrados na figura, aquele que melhor representa a força elétrica resultante que atua sobre q .



Problema 13.

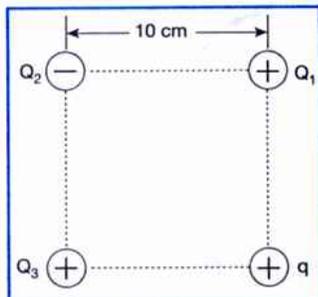
14. A figura deste problema mostra duas cargas pontuais, $Q_1 = 4,0 \mu\text{C}$ e $Q_2 = -1,5 \mu\text{C}$. Uma carga positiva $q = 2,0 \times 10^{-7} \text{ C}$ é colocada no ponto P_1 situado a 5,0 cm de Q_2 . Supondo que estas cargas estejam no ar, responda:



Problema 14.

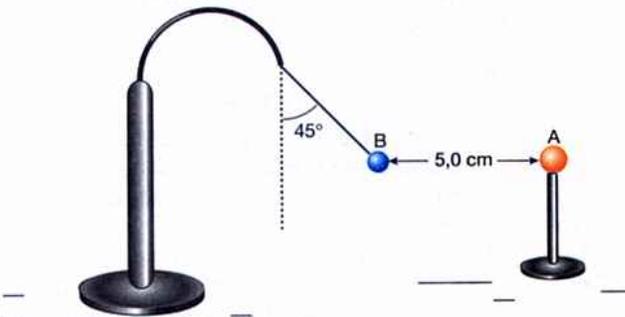
- Qual o módulo e o sentido da força exercida por Q_1 sobre q ?
 - Qual o módulo e o sentido da força exercida por Q_2 sobre q ?
 - Qual o módulo e o sentido da força elétrica resultante que atua sobre q ?
15. Considerando a figura e os dados do problema anterior, determine o módulo e o sentido da força elétrica resultante que atuaria em q se ela fosse colocada no ponto P_2 , situado a 5,0 cm de Q_2 .
16. Duas forças elétricas pontuais, situadas no ar, se repelem com uma certa força \vec{F} .
- Se estas cargas forem mergulhadas na água (mantendo-se constante sua separação) a força entre elas aumentará ou diminuirá? Quantas vezes?
 - Para que, ao serem mergulhadas na água, a força entre as cargas não sofra alteração, a distância entre elas deverá ser aumentada ou diminuída? Quantas vezes?

17. Em um cristal de cloreto de sódio, a distância entre dois íons adjacentes Na^+ e Cl^- é de, aproximadamente, 3×10^{-10} m.
- Supondo que o cristal se encontre no ar, calcule o valor da força elétrica na atração entre estes íons.
 - Se o cristal for mergulhado na água, o que ocorrerá com o valor desta força de atração?
 - Explique, então, por que a água é um bom solvente para o cloreto de sódio.
18. Dois pequenos corpos celestes, de mesma massa m , estão separados por uma distância r . Cada um é então eletrizado com uma mesma carga Q , de tal modo que a força de repulsão elétrica entre estas cargas equilibre a atração gravitacional entre os dois corpos. Determine o valor de Q em função da constante gravitacional, G , da constante k_0 (da lei de Coulomb) e da massa m de cada corpo.
19. Sobre uma mesa lisa, isolante, nos vértices de um quadrado de lado igual a 10 cm, estão fixadas as cargas puntuais $Q_1 = 5,0 \mu\text{C}$, $Q_2 = -5,0 \mu\text{C}$ e $Q_3 = 5,0 \mu\text{C}$, mostradas na figura deste problema. No vértice restante do quadrado é abandonada uma pequena esfera de massa $m = 100$ g e eletrizada com uma carga $q = 2,0 \mu\text{C}$. Determine o módulo, a direção e o sentido da aceleração que será adquirida por esta esfera.



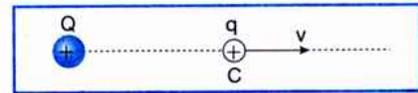
Problema 19.

20. Na figura deste problema a pequena esfera A e o pêndulo B possuem cargas de mesmo módulo e de sinais contrários. Sabendo-se que B está em equilíbrio e que sua massa vale 10 g, determine o módulo da carga em cada um destes corpos (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$).



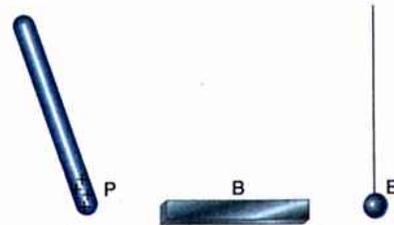
Problema 20.

21. Em um átomo de hidrogênio, o elétron gira em torno do próton em uma órbita circular cujo raio vale aproximadamente $r = 5 \times 10^{-11}$ m. Considerando que a massa do elétron é $m = 9 \times 10^{-31}$ kg, calcule a velocidade com que ele está girando em torno do próton (lembre-se de que a força centrípeta no elétron é proporcionada pela atração elétrica do próton sobre ele).
22. Uma carga elétrica puntual $+Q$ encontra-se fixada sobre uma mesa isolante (veja a figura). Um pequeno corpo C , eletrizado com uma carga também positiva $+q$, é abandonado sobre a mesa, nas proximidades de $+Q$. Considere que a força resultante que atua sobre C é devida apenas à carga Q . Enquanto C se desloca:



Problema 22.

- O módulo de sua aceleração aumenta, diminui ou não se altera?
 - E o módulo de sua velocidade?
23. Uma barra isolante P , eletrizada positivamente, é colocada nas proximidades de uma barra metálica B , não eletrizada, como mostra a figura deste problema. A pequena esfera condutora E está também descarregada, suspensa por um fio isolante, próxima de uma das extremidades de B .



Problema 23.

- Descreva a distribuição de cargas nos corpos B e E , no momento em que o corpo P é aproximado de B .
 - A esfera E se deslocará? Explique.
24. Em Física Moderna, na análise da interação entre partículas atômicas, a força gravitacional é considerada uma *interação fraca* (comparada com a força elétrica). A razão desta denominação ficará clara se você responder as seguintes questões:
- Calcule a força elétrica de atração entre o próton e o elétron em um átomo de hidrogênio. Considere os seguintes valores aproximados: carga do próton = 10^{-19} C
raio do átomo de hidrogênio = 10^{-10} m
constante da lei de Coulomb, $k_0 = 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$
 - Calcule, agora, a força gravitacional entre aquelas partículas, ainda no átomo de hidrogênio.

Considere os seguintes valores:

massa do próton = 10^{-27} kg

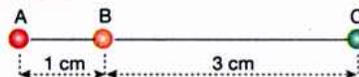
massa do elétron = 10^{-30} kg

constante gravitacional, $G = 10^{-10}$ N · m²/kg²

- c) Qual dessas forças é maior? Quantas vezes? (Você percebe agora por que a força gravitacional é uma interação fraca?)
25. Um núcleo de Pb^{210} emite um elétron, transformando-se em um núcleo de Bi^{210} . Levando em conta a conservação da carga elétrica, como se comparam as cargas elétricas dos núcleos de Bi^{210} e Pb^{210} ?
26. Uma esfera de cobre eletrizada é ligada a um fio metálico. Encosta-se a ponta livre do fio, sucessivamente, em uma esfera de borracha, uma de isopor e outra de alumínio. As esferas estão isoladas da terra e têm todas o mesmo diâmetro. Qual a conclusão que podemos tirar sobre a carga que cada uma destas três esferas recebe?
27. Duas esferas de mesmo raio possuem cargas elétricas iguais, uniformemente distribuídas em suas superfícies. Colocando-se uma esfera próxima da outra, dizer em qual dos dois casos seguintes a força de repulsão entre elas será maior:
- 1° — as duas esferas são de isopor.
 - 2° — as duas esferas são de latão.
28. Um bastão eletricamente carregado atrai uma bolinha condutora X, mas repele uma bolinha condutora Y. Na ausência do bastão, verifica-se que X e Y

se atraem (as atrações e repulsões mencionadas são todas de origem elétrica). Responda, justificando sua resposta:

- a) A bolinha X poderia estar descarregada?
 - b) A bolinha X poderia estar eletrizada?
 - c) A bolinha Y poderia estar descarregada?
29. Três pequenos objetos, com cargas elétricas idênticas, estão alinhados como mostra a figura deste problema. O objeto C exerce sobre B uma força igual a $3,0 \times 10^{-4}$ N. Qual é o módulo da força elétrica resultante que atua sobre B, em virtude das ações de A e C?



Problema 29.

30. Duas cargas elétricas pontuais, de mesmo módulo e mesmo sinal, são mantidas a uma distância fixa uma da outra e estão se repelindo com uma força \vec{F} . Uma terceira carga, igual às anteriores, é colocada no ponto médio entre elas. A força \vec{F} entre as duas primeiras cargas é alterada pela presença da terceira? Explique.
31. Verifica-se experimentalmente que aumentando-se a temperatura de um dielétrico polar (como a água, por exemplo), o valor de sua constante dielétrica se modifica. Você acha que o valor de K aumenta ou diminui quando se aumenta a temperatura? Explique.

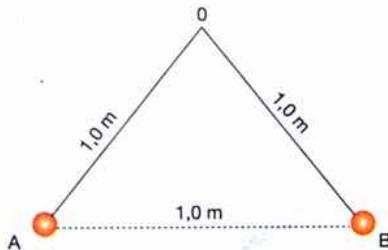
Resolva questões de vestibular questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

Resolva problemas suplementares problemas suplementares

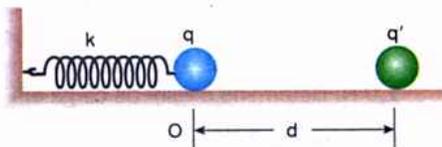
1. Calcule a carga elétrica total existente em 1 kg de elétrons.
2. Uma carga elétrica repele um pêndulo elétrico, situado a 5 cm de distância, com uma certa força \vec{F} . Para exercer sobre o pêndulo a mesma força \vec{F} , uma segunda carga deve estar a 10 cm de distância dele. Esta segunda carga é maior ou menor do que a primeira? Quantas vezes?
3. Suponha que você coloque uma colher de cloreto de sódio em um copo de óleo e outra em um copo de glicerina. Em qual deles o sal se apresentará mais dissolvido? Por quê?
4. Duas pequenas esferas, ambas carregadas positivamente, apresentam carga total de $5,0 \times 10^{-5}$ C. Verifica-se que quando estão separadas por uma distância de 2,0 m, elas se repelem com uma força de 1,0 N. Determine o valor da carga em cada esfera.
5. Um núcleo de U^{238} emite uma partícula α (núcleo do átomo de He), dando origem a um núcleo de Th^{234} . Imediatamente após a emissão, a distância entre o núcleo de Th^{234} e a partícula α é 9×10^{-15} m. Calcule neste instante:
 - a) o valor da força elétrica que atua na partícula α .
 - b) a aceleração desta partícula.

6. Duas cargas puntuais A e B, eletrizadas positivamente com cargas $Q_A = 25 \mu\text{C}$ e $Q_B = 16 \mu\text{C}$, estão fixas, separadas por uma distância $d = 9,0 \text{ cm}$. Determine a que distância da carga A deve ser colocado um pequeno corpo eletrizado C para que ele fique em equilíbrio (suponha que sobre C atuem apenas as forças elétricas devidas a A e B).
7. Duas pequenas esferas condutoras idênticas, A e B, de mesma massa $m = 0,30 \text{ g}$, encontram-se no ar suspensas por dois fios leves, isolantes, ambos medindo $1,0 \text{ m}$ de comprimento e presos em um mesmo ponto de suspensão O. Uma das esferas é eletrizada com uma carga Q e, em seguida, é colocada em contato com a outra esfera. Elas se repelem, então, atingindo a posição de equilíbrio quando estiverem separadas por uma distância de $1,0 \text{ m}$ (veja a figura deste problema). Determine o valor da carga Q , considerando $g = 10 \text{ m/s}^2$.



Problema Suplementar 7.

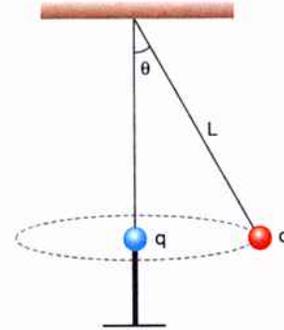
8. No problema anterior, suponha que a carga Q seja positiva. Determine o sinal e o valor de uma carga q que deve ser colocada no ponto O, a fim de que sejam nulas as tensões nos dois fios de suspensão.
9. Uma partícula de massa $m = 10 \text{ g}$ e carga $q = -2,0 \mu\text{C}$ é presa a uma mola de massa desprezível. O período de oscilação deste sistema é $T = (0,40 \pi) \text{ s}$. Uma outra partícula, de carga $q' = 0,20 \mu\text{C}$, é fixada a uma distância d da posição de equilíbrio O da carga q (veja a figura deste problema). Verifica-se que a nova posição de equilíbrio de q está situada a uma distância $X = 40 \text{ cm}$ do ponto O. Calcular o valor da distância d .



Problema Suplementar 9.

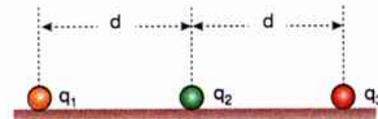
10. Uma pequena esfera de massa m e carga $+q$, suspensa por um fio de comprimento L , gira em movimento circular uniforme em torno de outra carga fixa igual a ela, da maneira mostrada na figura

deste problema. Calcular a velocidade angular ω da esfera, considerando os seguintes valores: $m = 65 \text{ g}$, $q = 1,5 \mu\text{C}$, $L = 1,0 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, ângulo do fio com a vertical $\theta = 30^\circ$.



Problema Suplementar 10.

11. Duas pequenas esferas metálicas idênticas são eletrizadas com cargas $Q_1 = 10,0 \mu\text{C}$ e $Q_2 = -6,0 \mu\text{C}$. Mede-se a força de atração entre estas esferas quando elas estão separadas por uma certa distância d . Em seguida, as esferas são postas em contato e novamente separadas, sendo colocadas à mesma distância d uma da outra. Nesta situação, a força entre elas é novamente medida.
- Qual a carga de cada esfera após ser estabelecido o contato entre elas? (lembre-se que as esferas são idênticas)
 - Na situação final, as esferas estarão se atraindo ou se repelindo?
 - Quantas vezes o módulo da força inicial entre as esferas é maior do que o módulo da força final?
12. Três pequenos corpos eletrizados, com cargas q_1 , q_2 e q_3 , estão situados sobre uma mesa horizontal sem atrito. Estes corpos encontram-se em equilíbrio nas posições mostradas na figura deste problema. Sendo $q_2 = +1,5 \mu\text{C}$, determine:
- Os sinais das cargas q_1 e q_3 .
 - O valor destas cargas.



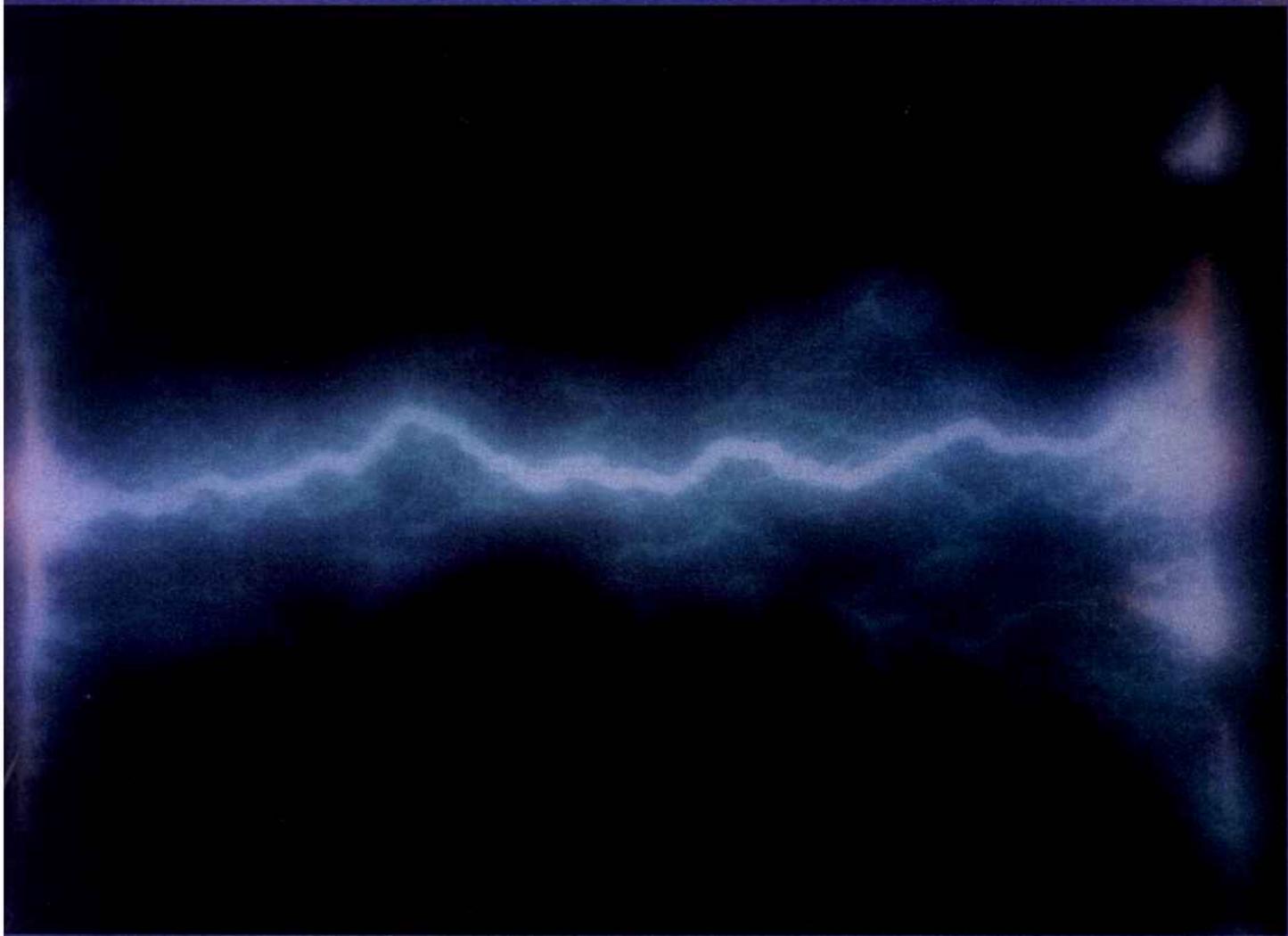
Problema Suplementar 12.

13. Uma carga Q deve ser distribuída entre duas pequenas esferas que estão situadas a uma distância fixa uma da outra. Como deve ser feita esta distribuição para que a força de repulsão entre as esferas tenha um valor máximo?

Observação: Você poderá resolver este problema usando conhecimentos de cálculo diferencial (máximos e mínimos) ou lembrando-se de seus estudos do trinômio do 2º grau.

capítulo 18

Campo elétrico



Phil Jude/SPL/Stock Photos

Uma centelha elétrica salta entre as duas esferas eletrizadas quando o campo elétrico entre elas é tão intenso que faz o ar tornar-se um condutor de eletricidade.

18.1. O conceito de campo elétrico

O QUE SE ENTENDE POR CAMPO ELÉTRICO

Considere uma carga Q fixa em uma determinada posição, como mostra a fig. 18-1. Já sabemos que se uma outra carga q for colocada em um ponto P_1 , a uma certa distância de Q , aparecerá uma força elétrica \vec{F} atuando sobre q (fig. 18-1).

Suponha, agora, que a carga q fosse deslocada, em torno de Q , para outros pontos quaisquer, tais como P_2, P_3 , etc. Evidentemente, em cada um destes pontos estaria também atuando sobre q uma força elétrica, exercida por Q . Para descrever este fato, dizemos que em qualquer ponto do espaço em torno de Q existe um *campo elétrico* criado por esta carga.

Podemos então destacar:

dizemos que em um ponto do espaço existe um campo elétrico quando uma carga q , colocada neste ponto, for solicitada por uma força de origem elétrica.

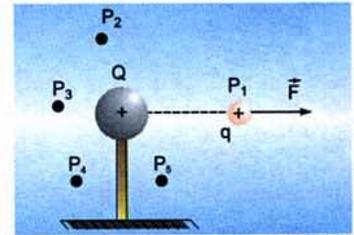


Fig. 18-1: Ilustração esquemática. Em torno de uma carga elétrica, Q , existe um campo elétrico criado por esta carga.

Voltando à fig. 18-1, devemos observar que o campo elétrico é criado nos pontos P_1, P_2, P_3 , etc., pela carga Q a qual, naturalmente, poderá ser tanto positiva (como a da figura) quanto negativa. A carga q que é deslocada de um ponto a outro, para verificar se existe ou não, nestes pontos, um campo elétrico, é denominada *carga de prova* (ou carga de teste).

COMENTÁRIOS

- 1) É importante salientar que a existência do campo elétrico em um ponto não depende da presença da carga de prova naquele ponto. Assim, existe um campo elétrico em cada um dos pontos P_2, P_3, P_4 e P_5 da fig. 18-1, embora não haja carga de prova em nenhum deles. Quando colocamos uma carga de prova em um ponto, queremos apenas verificar se atua, ou não, uma força elétrica sobre ela, o que nos permite concluir se existe, ou não, um campo elétrico naquele ponto.
- 2) Estamos habituados a dizer que, na fig. 18-1, a força elétrica \vec{F} é exercida por Q sobre q . Com a introdução do conceito de campo elétrico, podemos visualizar esta interação de uma maneira diferente: dizemos que a carga Q cria um campo elétrico nos pontos do espaço em torno dela e que este campo elétrico é o responsável pelo aparecimento da força elétrica sobre a carga q colocada naqueles pontos. Em outras palavras, consideramos que a força elétrica que atua sobre q é *devida à ação do campo elétrico* e não à ação direta de Q sobre q .
- 3) O conceito de *campo* não é restrito apenas ao estudo dos fenômenos elétricos. Assim, dizemos que em torno da Terra (ou em torno de qualquer corpo material) existe um *campo gravitacional*, pois uma massa m , colocada em qualquer ponto do espaço em torno da Terra, fica submetida à ação de uma



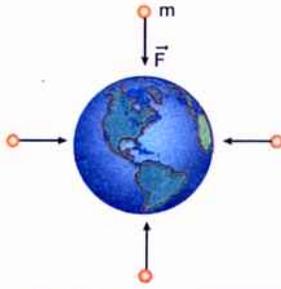


Fig. 18-2: Ilustração esquemática. Em torno da Terra (ou em torno de qualquer corpo material) existe um campo gravitacional.

força exercida por ela (fig. 18-2). Da mesma forma, em um ambiente qualquer (numa sala, por exemplo), podemos dizer que existe um *campo de temperatura*, pois em cada ponto do ambiente temos uma temperatura bem determinada, própria daquele ponto.

De um modo geral, sempre que a cada ponto de uma certa região corresponder um valor de uma dada grandeza, dizemos que, naquela região, existe um campo associado àquela grandeza. Este campo poderá ser um campo escalar (como o campo de temperaturas) ou um campo vetorial (como o campo elétrico e o campo gravitacional).

O VETOR CAMPO ELÉTRICO

O campo elétrico pode ser representado, em cada ponto do espaço, por um vetor, usualmente simbolizado por \vec{E} e que se denomina *vetor campo elétrico*. Vamos apresentar, a seguir, as características deste vetor, isto é, seu módulo, sua direção e seu sentido.

1) *Módulo do vetor \vec{E}* — O módulo do vetor \vec{E} , em um dado ponto, costuma ser denominado *intensidade do campo elétrico* naquele ponto. Para definir este módulo, consideremos a carga Q , mostrada na fig. 18-3, criando um campo elétrico no espaço em torno dela. Colocando-se uma carga de prova q em um ponto qualquer, como o ponto P_1 , por exemplo, uma força elétrica \vec{F} atuará sobre esta carga de prova. A intensidade do campo elétrico em P_1 será, por definição, dada pela expressão

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

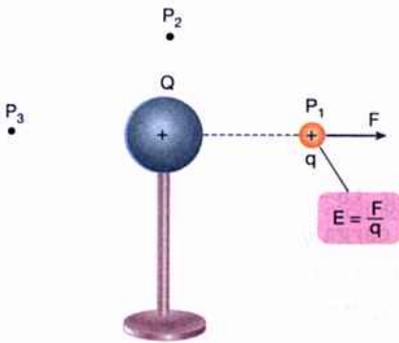


Fig. 18-3: Ilustração esquemática. Em cada ponto do espaço, em torno de uma carga Q , o campo elétrico é representado por um vetor campo elétrico, \vec{E} .

É fácil perceber que a unidade para a medida de E será, no S.I., 1 N/C.

A expressão $E = F/q$ nos permite determinar a intensidade do campo elétrico em qualquer outro ponto, tal como P_2 ou P_3 etc. De maneira geral, o valor de E será diferente para cada um desses pontos, a não ser em casos especiais, que analisaremos posteriormente.

Observe que, de $E = F/q$, obtemos

$$F = qE$$

isto é, se conhecermos a intensidade, E , do campo elétrico em um ponto, poderemos calcular, usando a expressão anterior, o módulo da força que atua em uma carga qualquer, q , colocada naquele ponto.

2) *Direção e sentido de \vec{E}* — A direção e o sentido do vetor campo elétrico em um ponto são, por definição, dados pela direção e sentido da força que atua em uma carga de prova *positiva* colocada no ponto.

Por exemplo: consideremos o ponto P_1 mostrado na fig. 18-4. Se uma carga de prova positiva fosse colocada em P_1 , ela seria, evidentemente, repelida por Q com uma força horizontal para a direita. Portanto, em virtude do que acabamos de dizer, o vetor campo elétrico \vec{E}_1 , naquele ponto, seria também horizontal e dirigido para a direita. De modo análogo, podemos concluir que em P_2 temos um vetor \vec{E}_2 dirigido verticalmente para cima; pois, se uma

carga de prova positiva fosse colocada neste ponto, ela ficaria sob a ação de uma força com aquela direção e naquele sentido. Você poderá, então, verificar facilmente que, em P_3 e P_4 , os vetores \vec{E}_3 e \vec{E}_4 têm as direções e os sentidos indicados na fig. 18-4.

Suponha, agora, que a carga que cria o campo seja negativa, como mostra a fig. 18-5. Neste caso, se colocássemos a carga de prova *positiva* em P_1 , ela seria atraída por Q com uma força para a esquerda. Portanto, o vetor campo elétrico estaria agora dirigido para a esquerda (sempre no mesmo sentido da força que atua na carga de prova positiva). Seguindo esta orientação, você poderá concluir que em P_2 , P_3 e P_4 o vetor campo elétrico será representado pelos vetores \vec{E}_2 , \vec{E}_3 e \vec{E}_4 mostrados na fig. 18-5.

Resumindo o que foi dito, temos:

sendo F o módulo da força elétrica que atua em uma carga de prova q , colocada em um ponto do espaço, o vetor campo elétrico \vec{E} neste ponto tem uma intensidade obtida pela relação

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

A direção e o sentido do vetor \vec{E} são dados pela direção e sentido da força que atua na carga de prova positiva colocada no ponto.

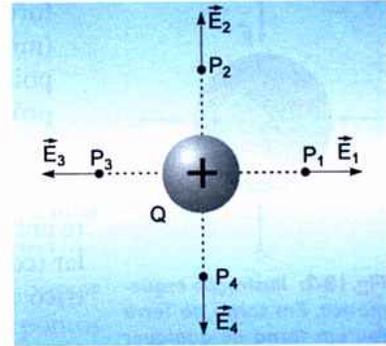


Fig. 18-4: Ilustração esquemática. A carga Q , positiva, cria nos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 os vetores campos elétricos $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ e \vec{E}_4 , com direções e sentidos indicados na figura.

MOVIMENTO DE CARGAS EM UM CAMPO ELÉTRICO

Suponha que uma carga *positiva* q seja colocada no ponto P_1 da fig. 18-4, no qual existe um campo elétrico \vec{E}_1 criado por Q . Como sabemos, a carga q será repelida por Q com uma força dirigida para a direita e, conseqüentemente, ela tenderá a se deslocar no sentido desta força. Já que o vetor \vec{E}_1 tem o mesmo sentido desta força, concluímos que a carga positiva q tende a se deslocar no sentido do campo elétrico. Se esta mesma carga positiva q for colocada no ponto P_1 da fig. 18-5 (campo criado por carga negativa), ela será atraída pela carga Q e tenderá, também neste caso, a se deslocar no sentido do campo elétrico \vec{E}_1 . De maneira geral podemos verificar que, em qualquer ponto que a carga positiva q for abandonada, ela tenderá a se deslocar no sentido do vetor campo elétrico existente naquele ponto (esta conclusão é uma conseqüência natural do fato de termos definido o sentido do vetor \vec{E} como sendo o mesmo sentido da força que atua na carga de prova positiva).

Imagine, agora, que coloquemos no ponto P_1 da fig. 18-4 uma carga *negativa* q (lembre-se que, em P_1 , existe um campo elétrico \vec{E}_1 dirigido para a direita, produzido pela carga Q). Nestas condições, a carga q será atraída por Q e tenderá, então, a se deslocar em sentido

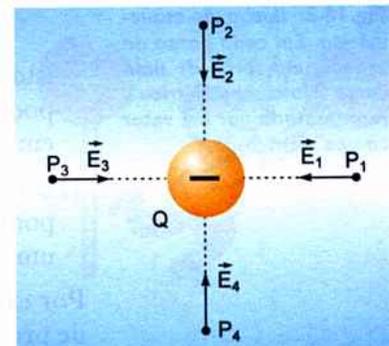


Fig. 18-5: Ilustração esquemática. A carga Q , negativa, cria nos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 os vetores campos elétricos $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ e \vec{E}_4 , com direções e sentidos indicados na figura.

contrário ao campo \vec{E}_1 . Se colocarmos a carga negativa q no ponto P_1 da fig. 18-5, ela será repelida pela carga negativa Q e, da mesma maneira, tenderá a se deslocar em sentido contrário ao do vetor \vec{E}_1 .

Em resumo:

uma carga positiva, colocada em um ponto onde existe um campo elétrico \vec{E} , tende a se deslocar no sentido deste campo, e uma carga negativa tende a se deslocar em sentido contrário ao do campo.

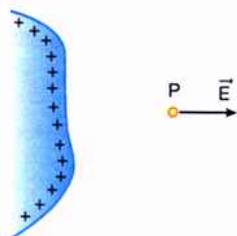


Fig. 18-6: Esquema para o exemplo da secção 18.1.

Exemplo

Uma pessoa verificou que, no ponto P da fig. 18-6, existe um campo elétrico \vec{E} , horizontal, para a direita, criado pelo corpo eletrizado mostrado naquela figura.

- a) Desejando medir a intensidade do campo em P , a pessoa colocou, neste ponto, uma carga $q = 2,0 \times 10^{-7}$ C e verificou que sobre ela atuava uma força $F = 5,0 \times 10^{-2}$ N. Qual é, então, a intensidade do campo em P ?

Como a intensidade do campo elétrico em um ponto qualquer é dada por $E = F/q$, temos

$$E = \frac{F}{q} = \frac{5,0 \times 10^{-2}}{2,0 \times 10^{-7}}$$

donde $E = 2,5 \times 10^5$ N/C

- b) Retirando-se a carga q e colocando-se em P uma carga positiva $q_1 = 3,0 \times 10^{-7}$ C, qual será o módulo da força \vec{F}_1 que atuará nesta carga e qual o sentido do movimento que ela tenderá a adquirir?

De $E = F/q$, temos $F = qE$. Logo,

$$F_1 = q_1 E = 3,0 \times 10^{-7} \times 2,5 \times 10^5 \quad \text{donde} \quad F_1 = 7,5 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Como a carga q_1 é positiva, sabemos que ela tenderá a se deslocar no mesmo sentido do vetor \vec{E} , isto é, ela tenderá a se deslocar para a direita na fig. 18-6.

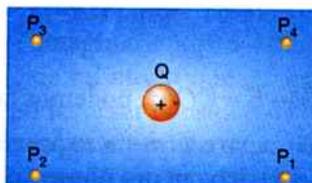
- c) Responda à questão anterior supondo que colocássemos em P uma carga negativa cujo módulo é $q_2 = 3,0 \times 10^{-7}$ C.

Como os valores das cargas q_1 e q_2 são iguais, o módulo da força \vec{F}_2 que atuará em q_2 será igual ao da força \vec{F}_1 que atuava em q_1 , ou seja, $F_2 = 7,5 \times 10^{-2}$ N. Entretanto, sendo q_2 uma carga negativa, ela tenderá a se deslocar para a esquerda, isto é, em sentido contrário ao do campo elétrico (observe que a força \vec{F}_2 aponta para a esquerda na fig. 18-6).

ios de fixação **exercícios de fixação** **exercícios de fixa**

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Uma carga positiva Q está fixa no centro de uma mesa horizontal, como mostra a figura deste exercício. Uma pessoa, desejando verificar se existe um campo elétrico em P_1 , coloca, neste ponto, uma carga q .
 - Por que a pessoa poderá concluir que existe um campo elétrico em P_1 ?



Exercício 1.

- b) Qual é a carga que criou o campo elétrico em P_1 ?
 c) Como se denomina a carga q colocada em P_1 ?
 d) Retirando-se a carga q do ponto P_1 , o campo elétrico continuará existindo neste ponto?
2. Em uma cópia da figura do exercício anterior, desenhe o vetor campo elétrico em cada um dos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 .
3. Supondo que, no exercício 1, a carga Q fosse negativa, desenhe o vetor campo elétrico em cada um dos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 .
4. Verifica-se que uma carga positiva $q = 1,5 \mu\text{C}$, colocada em um ponto P , fica sujeita a uma força elétrica $F = 0,60 \text{ N}$, vertical, para baixo (veja a figura deste exercício).
- a) Qual é a intensidade do campo elétrico no ponto P ?
 b) Mostre, em uma cópia da figura, a direção e o sentido do vetor \vec{E} em P .



Exercício 4.

5. Em um ponto do espaço existe um campo elétrico $E = 5,0 \times 10^4 \text{ N/C}$, horizontal, para a esquerda. Colocando-se uma carga q neste ponto, verifica-se que ela tende a se mover para a direita, sujeita a uma força elétrica de módulo $F = 0,20 \text{ N}$.
- a) Qual é o sinal da carga q ?
 b) Determine, em μC , o valor de q .

18.2. Campo elétrico criado por cargas pontuais

CAMPO DE UMA CARGA PUNTUAL

A expressão $E = F/q$ nos permite calcular a intensidade do campo elétrico, quaisquer que sejam as cargas que criam este campo. Vamos aplicá-la a um caso particular, no qual a carga que cria o campo é uma carga puntual.

Consideremos, então, uma carga puntual Q , no ar, e um ponto situado a uma distância r desta carga (fig. 18-7). Se colocarmos uma carga de prova q neste ponto, ela ficará sujeita a uma força elétrica \vec{F} , cujo módulo poderá ser calculado pela lei de Coulomb, isto é,

$$F = k_0 \frac{Qq}{r^2}$$

Como $E = F/q$, obtemos facilmente

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2}$$

Portanto, esta expressão nos permite calcular a intensidade do campo em um certo ponto, quando conhecemos o valor da carga puntual Q que criou este campo e a distância do ponto a esta carga. Observe, entretanto, que esta expressão só pode ser usada para este caso (campo criado por uma carga puntual). Para outros tipos de cargas (não-pontuais) existem expressões apropriadas a cada caso e que não serão analisadas em nosso curso.

COMENTÁRIOS

Analisando a expressão $E = k_0 Q/r^2$, podemos fazer as seguintes observações:

- 1) A carga de prova q não aparece nesta expressão. Assim, concluímos que a intensidade do campo elétrico em um ponto *não* depende da carga de prova q

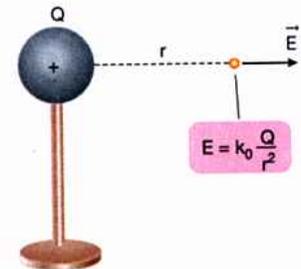


Fig. 18-7: Representação esquemática de módulo, direção e sentido do vetor campo elétrico, criado pela carga puntual Q , em um ponto cuja distância à carga é igual a r .

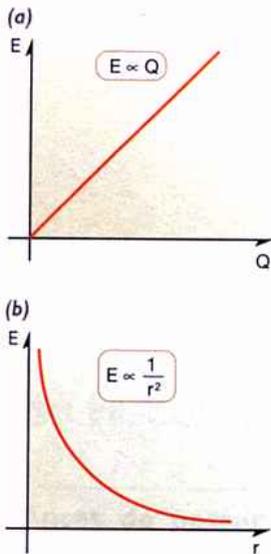


Fig. 18-8: Aspectos dos gráficos $E \times Q$ e $E \times r$.

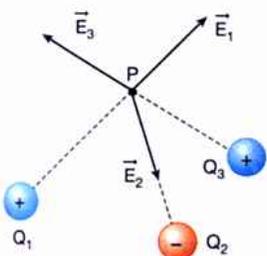


Fig. 18-9: Ilustração esquemática. As cargas Q_1 , Q_2 e Q_3 criam no ponto P os vetores campos elétricos E_1 , E_2 e E_3 .

(ao contrário do que se poderia pensar, à primeira vista, analisando erroneamente a expressão $E = F/q$).

- 2) A intensidade E , em um dado ponto, é diretamente proporcional à carga Q que cria o campo. Então, na fig. 18-7, fazendo variar o valor de Q , a intensidade do campo, no ponto mostrado, variará de tal modo que o gráfico $E \times Q$ terá o aspecto mostrado na fig. 18-8-a.
- 3) A expressão nos mostra, também, que no campo elétrico de uma dada carga Q , o valor de E será tanto menor quanto maior for a distância r entre o ponto e a carga Q . Na realidade, tem-se $E \propto 1/r^2$, isto é, a intensidade do campo é inversamente proporcional ao quadrado da distância r . Sendo assim, temos um gráfico $E \times r$ como aquele mostrado na fig. 18-8-b.

CAMPO DE VÁRIAS CARGAS PUNTOAIS

Consideremos várias cargas elétricas pontuais Q_1 , Q_2 , Q_3 , etc., como mostra a fig. 18-9. Suponhamos que desejássemos calcular o campo elétrico que o conjunto destas cargas cria em um ponto P qualquer do espaço. Para isto devemos calcular, inicialmente, o campo \vec{E}_1 criado em P apenas pela carga Q_1 .

Como Q_1 é uma carga pontual, o valor de E_1 poderá ser calculado usando-se a expressão $E = k_0 Q/r^2$. A direção e o sentido de \vec{E}_1 , mostrados na fig. 18-9, foram determinados de acordo com o que estudamos na seção anterior. A seguir, de maneira análoga, determinamos o campo \vec{E}_2 , criado por Q_2 , o campo \vec{E}_3 , criado por Q_3 , etc. O campo elétrico \vec{E} , existente no ponto P , será dado pela resultante dos campos \vec{E}_1 , \vec{E}_2 , \vec{E}_3 , etc. produzidos separadamente pelas cargas Q_1 , Q_2 , Q_3 , etc., isto é,

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

Então, o campo elétrico \vec{E} , criado por várias cargas pontuais, é obtido por meio de uma soma vetorial, operação esta que aprendemos a efetuar no capítulo 4 de nosso curso.

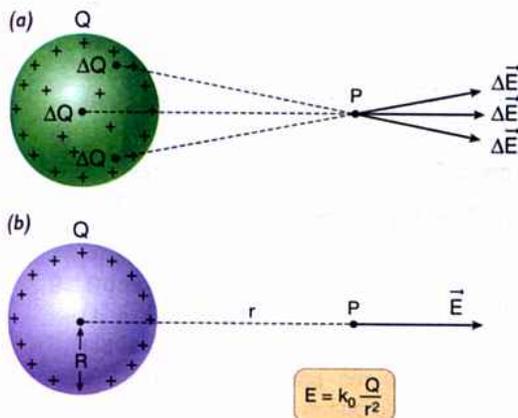


Fig. 18-10: Representação do vetor campo elétrico \vec{E} , criado por uma esfera eletrizada, em um ponto P , situado a uma distância r do centro da esfera.

CAMPO DE UMA ESFERA

Imagine, agora, que tivéssemos uma esfera eletrizada, possuindo uma carga Q distribuída uniformemente em sua superfície. Supondo que o raio desta esfera não seja desprezível, estaremos diante de uma situação nova, isto é, uma carga Q não-pontual, criando um campo elétrico no espaço em torno dela.

Para calcular o campo elétrico em um ponto P exterior à esfera (fig. 18-10-a), teríamos que usar um artifício: imaginariamos a esfera dividida em pequenas porções, de tal modo que a carga ΔQ existente em cada porção pudesse ser considerada como uma carga pontual. Cada uma dessas pequenas cargas ΔQ criaria em P um pequeno campo $\Delta \vec{E}$ (fig. 18-10-a), que poderia ser facil-

mente calculado. O campo em P , devido à carga total, Q , da esfera seria obtido somando-se vetorialmente estes pequenos campos.

Realizando-se esta operação (que não será desenvolvida aqui por exigir cálculos matemáticos de nível superior), chega-se ao seguinte resultado: o campo \vec{E} , criado em P pela carga Q da esfera, tem a direção e o sentido mostrado na fig. 18-10-b e seu módulo é dado por

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2}$$

onde r é a distância do ponto P ao centro da esfera. Observe que esta expressão é idêntica àquela que nos fornece o campo elétrico criado por uma carga puntual. Concluimos, então, que o campo criado por uma esfera eletrizada, em pontos exteriores a ela, pode ser calculado imaginando-se que toda a carga da esfera estivesse concentrada (como se fosse uma carga puntual) em seu centro.

Se na fig. 18-10-b considerássemos um ponto situado bem próximo à superfície da esfera, sua distância ao centro dela seria praticamente igual a R (raio da esfera). Portanto, o campo neste ponto seria dado por

$$E = k_0 \frac{Q}{R^2}$$

Deve-se salientar que a análise que acabamos de fazer só é válida para pontos exteriores à esfera. A determinação do campo elétrico em pontos no interior da esfera será estudada na secção 18.4.

Exemplo

Uma esfera de raio $R = 8,0$ cm está eletrizada negativamente com uma carga de valor $Q = 3,2 \mu\text{C}$, uniformemente distribuída em sua superfície (fig. 18-11).

Considere um ponto P situado a $4,0$ cm da superfície da esfera.

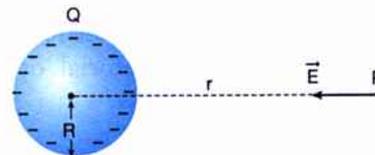


Fig. 18-11: Esquema para o exemplo da secção 18.2.

a) Qual é o sentido do campo elétrico criado pela esfera no ponto P ?

O campo criado por uma carga negativa está sempre voltado para esta carga. Logo, o vetor \vec{E} no ponto P terá a direção e o sentido mostrados na fig. 18-11.

b) Supondo a esfera no ar, qual será a intensidade do campo elétrico no ponto P ?

A intensidade do campo elétrico criado por uma esfera é dada por $E = k_0 Q/r^2$, onde r é a distância do ponto ao centro da esfera. Logo, temos

$$r = 8,0 \text{ cm} + 4,0 \text{ cm} = 12 \text{ cm} \quad \text{ou} \quad r = 12 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Como $Q = 3,2 \mu\text{C} = 3,2 \times 10^{-6} \text{ C}$, virá

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2} = 9,0 \times 10^9 \times \frac{3,2 \times 10^{-6}}{(12 \times 10^{-2})^2} \quad \text{donde} \quad E = 2,0 \times 10^6 \text{ N/C}$$

- c) Se uma carga puntual negativa, de valor $q = 3,5 \times 10^{-7} \text{ C}$, for colocada em P , qual será o módulo, a direção e o sentido da força elétrica \vec{F} que atuará sobre ela?

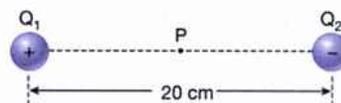
Como q é uma carga negativa, sabemos que ela ficará sujeita a uma força em sentido contrário ao do campo elétrico existente no ponto. Logo, quando q for colocada no ponto P da fig. 18-11, atuará sobre ela uma força \vec{F} dirigida para a direita. O módulo desta força poderá ser calculado por $F = qE$. Então

$$F = qE = 3,5 \times 10^{-7} \times 2,0 \times 10^6 \quad \text{donde} \quad F = 0,70 \text{ N}$$

Exercícios de fixação

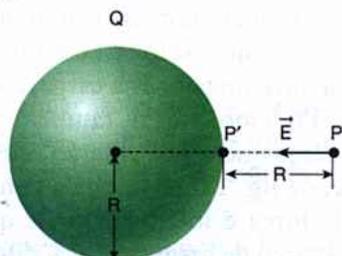
Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Uma carga elétrica puntual positiva, $Q = 4,5 \mu\text{C}$, encontra-se no ar. Considere um ponto P situado a uma distância $r = 30 \text{ cm}$ de Q .
 - Qual é a intensidade do campo elétrico criado por Q em P ?
 - Se o valor de Q fosse duplicado, quantas vezes maior se tornaria a intensidade do campo em P ?
 - Então, qual seria o novo valor do campo em P ?
- No exercício anterior, após duplicar o valor de Q , considere um ponto P' situado a 90 cm desta carga.
 - A distância de P' a Q é quantas vezes maior que a distância de P a Q ?
 - Então, a intensidade do campo em P' é quantas vezes menor do que em P ?
 - Logo, qual é a intensidade do campo em P' ?
- Considerando ainda o exercício 6, após duplicar o valor de Q , imagine que esta carga e o ponto P estivessem mergulhados em água (considere a constante dielétrica da água igual a 80).
 - O valor do campo elétrico em P seria maior ou menor do que no ar? Quantas vezes?
 - Então, qual seria, agora, a intensidade do campo em P ?
- Duas cargas puntuais, $Q_1 = 8,0 \times 10^{-7} \text{ C}$ e $Q_2 = -8,0 \times 10^{-7} \text{ C}$, encontram-se no ar, distanciadas de 20 cm (veja a figura deste exercício).
 - Desenhe, em uma cópia da figura, o vetor campo elétrico \vec{E}_1 criado pela carga Q_1 no ponto P , situado no meio da distância entre as duas cargas.
 - Qual é a intensidade deste campo \vec{E}_1 ?



Exercício 9.

- Na cópia da figura do exercício anterior, desenhe o vetor \vec{E}_2 criado por Q_2 no ponto P .
 - Qual é a intensidade deste campo \vec{E}_2 ?
 - Determine, então, o campo elétrico resultante criado por Q_1 e Q_2 em P .
- Uma esfera uniformemente eletrizada cria, em um ponto P exterior a ela, um campo elétrico $E = 1,5 \times 10^4 \text{ N/C}$, cuja direção e sentido estão mostrados na figura deste exercício. A distância de P à superfície da esfera é igual ao próprio raio da esfera.
 - Qual é o sinal da carga na esfera?
 - Considere um ponto P' muito próximo da superfície da esfera. A distância de P' ao centro da esfera é quantas vezes menor que a distância de P a este centro?
 - Então, a intensidade do campo em P' é maior ou menor do que em P ? Quantas vezes?
 - Logo, qual será a intensidade do campo em qualquer ponto próximo à superfície desta esfera?



Exercício 11.

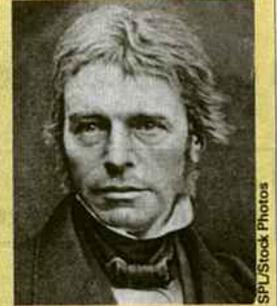
18.3. Linhas de força

O QUE SÃO LINHAS DE FORÇA

O conceito de linhas de força foi introduzido pelo físico inglês M. Faraday, no século XIX, com a finalidade de representar o campo elétrico através de diagramas.

Michael Faraday (1791-1867)

Físico experimental inglês de grande renome, Faraday iniciou sua carreira como vendedor de livros. Ele próprio afirmava que sua educação consistiu “em pouco mais do que ler, escrever e rudimentos de matemática” em uma escola primária comum. Assistindo a algumas conferências de Sir Humphrey Davy na Real Academia de Londres, passou a se interessar pelas pesquisas científicas, começando, sozinho, a estudar Química. Em 1813, foi admitido por Davy como seu assistente na Real Academia, iniciando uma brilhante carreira que o transformaria em um dos maiores físicos experimentais da história. São numerosas suas contribuições para o desenvolvimento da Química, do Magnetismo, da Eletricidade e da Ótica. Faraday foi também um excelente conferencista e possuía o dom de explicar com simplicidade os resultados das suas pesquisas para os não-cientistas.



SPL/Stock Photos

Para que possamos compreender esta concepção de Faraday, suponhamos uma carga puntual positiva Q criando um campo elétrico no espaço em torno dela. Como sabemos, em cada ponto deste espaço temos um vetor \vec{E} , cujo módulo diminui à medida que nos afastamos da carga. Na fig. 18-12-a estão representados estes vetores em alguns pontos em torno de Q . Consideremos os vetores $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ etc., que têm a mesma direção, e tracemos uma linha passando por estes vetores e orientada no mesmo sentido deles, como mostra a fig. 18-12-b. Esta linha é, então, tangente a cada um dos vetores $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ etc. Uma linha como esta é denominada *linha de força* do campo elétrico. De maneira semelhante, podemos traçar várias outras linhas de força do campo elétrico criado pela carga Q , como foi feito na fig. 18-12-b. Esta figura nos fornece uma representação do campo elétrico da maneira proposta por Faraday.

Se a carga criadora do campo for puntual negativa, sabemos que o vetor \vec{E} , em cada ponto do espaço, estará dirigido para esta carga, como mostra a fig. 18-13-a. Podemos traçar, também neste caso, as linhas de força que representarão este campo elétrico. Observe, na fig. 18-13-b, que a configuração destas linhas de força é idêntica àquela que representa o campo elétrico da carga positiva, diferindo apenas no sentido de orientação das linhas de força: no campo

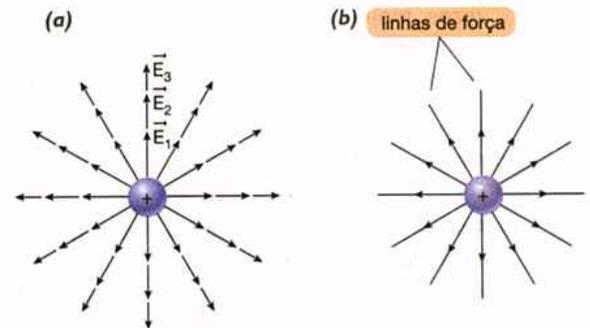


Fig. 18-12: Representação esquemática das linhas de força do campo elétrico criado por uma carga puntual positiva.

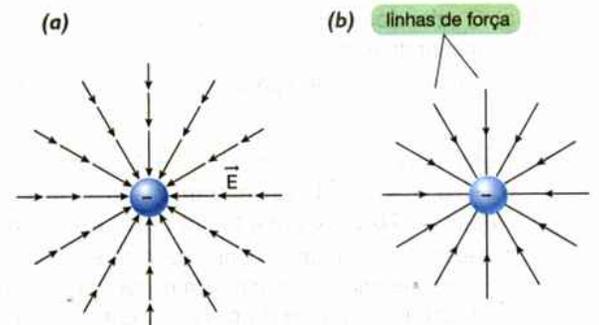


Fig. 18-13: Representação esquemática das linhas de força do campo elétrico criado por uma carga puntual negativa.

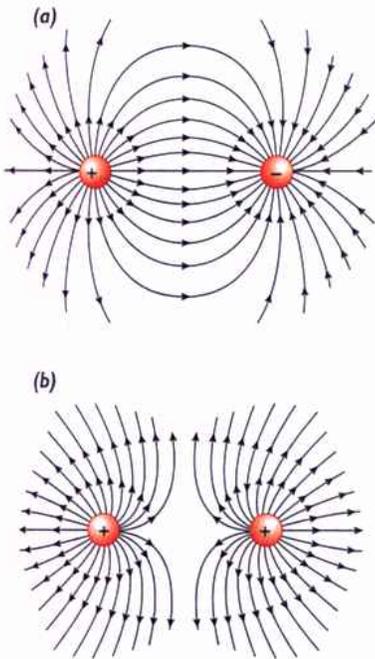


Fig. 18-14: Representação esquemática das linhas de força do campo elétrico criado por duas cargas de sinais contrários (a) e por duas cargas de sinais iguais (b).

da carga positiva as linhas divergem a partir da carga e no campo de uma carga negativa as linhas convergem para a carga.

COMENTÁRIOS

- 1) As linhas de força dos campos que acabamos de estudar apresentam uma configuração relativamente simples. Outras distribuições de cargas criam campos cujas linhas de força podem apresentar formas mais complicadas. Por exemplo: na fig. 18-14-a mostramos as linhas de força do campo elétrico criado por duas cargas pontuais de mesmo módulo, mas de sinais contrários, e na fig. 18-14-b vemos a configuração das linhas de força para o caso em que as duas cargas têm o mesmo sinal. Em todos os casos, cada linha de força deve ser traçada de maneira tal que, em cada ponto, o vetor \vec{E} seja tangente a ela.
- 2) As linhas de força podem ser traçadas de modo a nos dar informações não só sobre a direção e o sentido do vetor \vec{E} , mas também sobre o módulo deste vetor. Para isto, convencionou-se traçar as linhas de força mais próximas umas das outras nas regiões onde a intensidade do campo for maior e, portanto, as linhas deverão estar mais separadas nos pontos onde a intensidade do campo for menor. Por exemplo: observando as figs. 18-12-b e 18-13-b, vemos que as linhas de força estão mais juntas nas proximidades das cargas, indicando, como já sabíamos, que o campo é mais intenso nestas regiões. Observe também que, à medida que nos afastamos das cargas, as linhas se apresentam mais separadas, mostrando que a intensidade do campo está decrescendo.
- 3) Após estas considerações, fica claro que as linhas de força fornecem um diagrama capaz de representar o campo elétrico, como desejava Faraday. De fato

— sendo uma linha de força traçada de tal modo que, em cada ponto, o vetor \vec{E} seja tangente a ela, é possível determinar a direção e o sentido do campo em um ponto, quando conhecemos a linha de força que passa por este ponto.

— como as linhas de força são traçadas mais próximas umas das outras nas regiões onde o campo elétrico é mais intenso, observando a separação entre estas linhas é possível obter informações sobre o módulo do vetor campo elétrico.

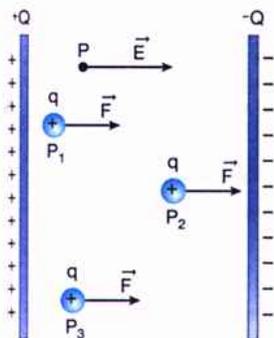


Fig. 18-15: Ilustração esquemática. Duas placas planas, paralelas, eletrizadas uniformemente com cargas de sinais contrários, criam um campo uniforme no espaço entre elas.

CAMPO ELÉTRICO UNIFORME

Consideremos duas placas planas, paralelas, separadas por uma distância pequena em relação às dimensões destas placas. Suponhamos que elas estejam uniformemente eletrizadas com cargas de mesmo módulo e de sinais contrários, como mostra a fig. 18-15.

Se colocarmos uma carga de prova positiva q em um ponto P₁ situado entre as placas (fig. 18-15), esta carga ficará sujeita à ação de uma força Fr, devido

ao campo elétrico criado pelas placas no espaço entre elas. A força \vec{F} é perpendicular às placas e está orientada, como você poderia prever, da placa positiva para a negativa. Deslocando-se a carga de prova q para outro ponto qualquer entre as placas (como o ponto P_2 , ou P_3 , etc.), verifica-se que irá atuar sobre q uma força \vec{F} de mesmo módulo, mesma direção e mesmo sentido que aquela que atuava quando q se encontrava em P_1 . Concluimos, então, que o campo elétrico existente entre estas placas tem, em qualquer ponto, o mesmo módulo (lembre-se de que $E = F/q$), a mesma direção e o mesmo sentido. Um campo como este é denominado *campo elétrico uniforme* e pode ser representado por um vetor \vec{E} , como aquele indicado no ponto P da fig. 18-15. Portanto

dizemos que um campo elétrico é uniforme, em uma dada região do espaço, quando ele apresentar o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido em todos os pontos desta região. A fig. 18-15 mostra uma das maneiras de se obter um campo elétrico uniforme: entre as duas placas, o vetor \vec{E} não varia ao passarmos de um ponto para outro, estando sempre orientado da placa positiva para a negativa.

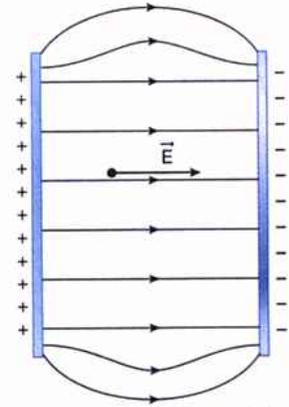


Fig. 18-16: Esquema de linhas de força do campo elétrico existente entre duas placas eletrizadas com cargas de sinais contrários.

Na fig. 18-16 estão traçadas as linhas de força do campo existente entre as duas placas. Observe que estas linhas são paralelas (a direção de \vec{E} não varia) e igualmente espaçadas (o módulo de \vec{E} é constante), indicando que o campo elétrico, nesta região, é uniforme. Deve-se notar, entretanto, que estas considerações são válidas para pontos não muito próximos das extremidades das placas. De fato, como mostra a fig. 18-16, nestas extremidades as linhas de força são curvas, indicando que aí o campo deixa de ser uniforme. A fotografia da fig. 18-17 foi obtida colocando-se sementes de grama entre duas placas eletrizadas com cargas de sinais contrários. Como podemos observar, estas sementes se orientam na direção do campo elétrico, apresentando, assim, uma configuração igual à das linhas de força. Este artifício constitui, portanto, uma “materialização” das linhas de força, possibilitando-nos “enxergar” o campo uniforme entre as placas.

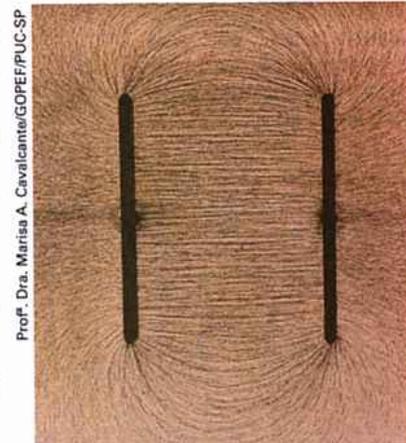


Fig. 18-17: Mapeamento das linhas de força do campo elétrico existente entre duas placas eletrizadas com carga de sinais contrários.

Exemplo

O campo elétrico entre as placas mostradas na fig. 18-18 vale $E = 2,0 \times 10^4$ N/C e a distância entre elas é $d = 7,0$ mm. Suponha que um elétron seja liberado, a partir do repouso, nas proximidades da placa negativa.

a) Qual é o módulo, a direção e o sentido da força elétrica \vec{F} que atua no elétron?

Como sabemos, o elétron tem carga negativa. Então, a força \vec{F} que atuará sobre ele terá a mesma direção e sentido contrário ao do campo elétrico \vec{E} , isto é, a força \vec{F} estará orientada da placa negativa para a positiva, como mostra a fig. 18-18.

O módulo de \vec{F} será dado por $F = qE$, onde q é a carga do elétron cujo valor consta na tabela que se encontra no final deste volume: $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C. Logo,

$$F = qE = 1,6 \times 10^{-19} \times 2,0 \times 10^4 \quad \text{donde} \quad F = 3,2 \times 10^{-15} \text{ N}$$

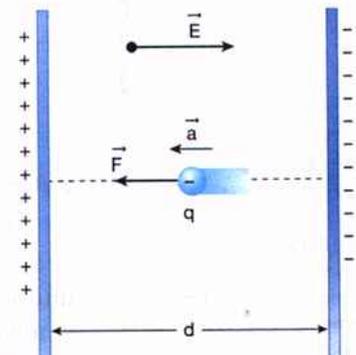


Fig. 18-18: Esquema para o exemplo da seção 18.3.

b) Sabendo-se que o peso do elétron é desprezível em comparação com a força elétrica que atua sobre ele, diga qual é o tipo de movimento que esta partícula irá descrever.

Como o campo entre as placas é uniforme, a força elétrica \vec{F} que atua no elétron permanece constante enquanto ele se desloca. Logo, esta força imprimirá ao elétron uma aceleração também constante, isto é, o movimento do elétron será retilíneo e uniformemente acelerado.

c) Qual é o valor da aceleração adquirida pelo elétron?

Esta aceleração poderá ser calculada pela 2ª Lei de Newton, $F = ma$, onde m é a massa do elétron, também encontrada na tabela no final deste volume: $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg. Logo,

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3,2 \cdot 10^{-15}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \quad \text{donde} \quad a = 3,5 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$$

Observe que, embora a força sobre o elétron seja relativamente pequena, ele adquire uma aceleração de valor extremamente elevado.

d) Quanto tempo o elétron gastará para se deslocar da placa negativa até a placa positiva?

Como o movimento é uniformemente acelerado, sabemos que a distância d que o elétron percorrerá será dada por $d = (1/2) at^2$ (lembre-se que $v_0 = 0$). Em nosso caso, temos $d = 7,0$ mm = $7,0 \times 10^{-3}$ m e $a = 3,5 \times 10^{15}$ m/s². Então,

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 7,0 \times 10^{-3}}{3,5 \times 10^{15}}} \quad \text{donde} \quad t = 2,0 \times 10^{-9} \text{ s}$$

e) Qual a velocidade do elétron ao chegar à placa positiva?

No movimento uniformemente acelerado, com $v_0 = 0$, sabemos que $v = at$. Assim,

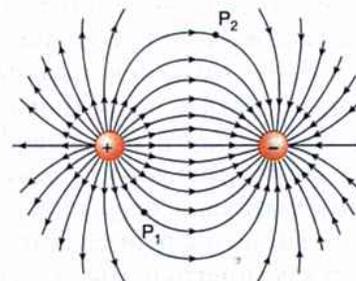
$$v = 3,5 \times 10^{15} \times 2,0 \times 10^{-9} \quad \text{donde} \quad v = 7,0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

12. A figura deste exercício apresenta as linhas de força do campo criado por duas cargas pontuais $+Q$ e $-Q$. Considere os pontos P_1 e P_2 da figura.

- Desenhe, em uma cópia da figura, os vetores \vec{E}_1 e \vec{E}_2 que representam o campo elétrico em cada um desses pontos.
- Observando a separação das linhas de força, você poderá concluir que E_1 é maior, menor ou igual a E_2 ?



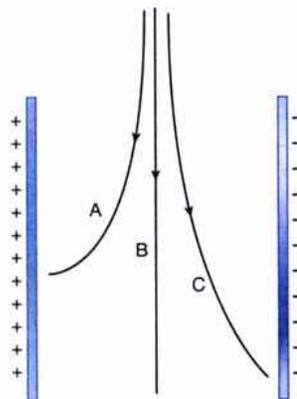
Exercício 12.

13. a) Na fig. 18-15, seja r a distância do ponto P_2 à placa positiva. O valor do campo neste ponto poderia ser calculado usando-se a expressão $E = k_0 Q/r^2$? Por quê?
- b) O valor do campo em P_2 poderia ser calculado pela relação $E = F/q$? Por quê?
14. No exemplo resolvido no final desta seção (fig. 18-18), suponha que, em lugar do elétron, fosse abandonado um próton nas proximidades da placa positiva.
- a) Qual seria o sentido da força elétrica que atuaria no próton?
- b) O valor da força no próton seria maior, menor ou igual ao da força que atuou no elétron? Por quê?
- c) À medida que o próton se deslocasse, a força elétrica sobre ele aumentaria, diminuiria ou permaneceria constante?
- d) Então, que tipo de movimento seria descrito pelo próton?
15. Considerando o próton mencionado no exercício anterior, responda:
- a) A aceleração que ele iria adquirir seria maior, menor ou igual àquela adquirida pelo elétron? Por quê?

b) Então, o tempo que o próton gastaria para ir de uma placa à outra seria maior, menor ou igual ao tempo gasto pelo elétron neste mesmo percurso?

16. Um feixe de partículas, constituído de prótons, nêutrons e elétrons, penetra em um campo uniforme criado entre duas placas eletrizadas. Observa-se que o feixe se divide em três outros, A, B e C, como mostra a figura deste exercício.

- a) Qual das partículas citadas constitui o feixe A? e o feixe B? e o feixe C?
- b) Por que a curvatura do feixe A é mais acentuada que a do feixe C?



Exercício 16.

18.4. Comportamento de um condutor eletrizado

A CARGA SE DISTRIBUI NA SUPERFÍCIE DO CONDUTOR

Suponha que um corpo condutor como, por exemplo, um bloco metálico, seja atritado em uma determinada região de sua superfície, adquirindo uma carga negativa. Evidentemente, esta carga aparece na região que foi atritada, como mostra a fig. 18-19.

Entretanto, estas cargas, constituídas por um excesso de elétrons, repelem-se mutuamente e atuam sobre os elétrons livres do condutor, fazendo com que eles se desloquem até atingir uma distribuição final, denominada *situação de equilíbrio eletrostático*, na qual as cargas no condutor apresentam-se em repouso. Ao ser atingida esta situação final de equilíbrio eletrostático (o que ocorre em um intervalo de tempo extremamente pequeno), verifica-se experimentalmente que a carga negativa adquirida pelo condutor apresenta-se distribuída em sua superfície (fig. 18-20).

Se o condutor fosse eletrizado positivamente, observaríamos o mesmo resultado final. A carga posi-



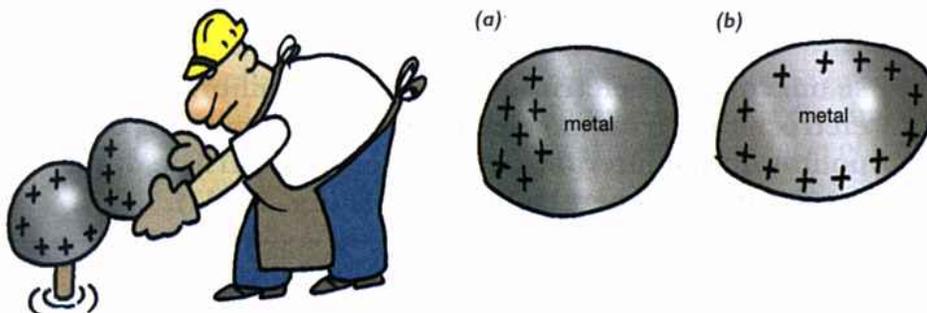
Fig. 18-19: Ilustração esquemática. O corpo mostrado, ao ser atritado, adquire carga negativa.



Fig. 18-20: Ilustração esquemática. Os elétrons livres adquiridos pelo condutor se distribuem em sua superfície.

tiva, adquirida pelo condutor em uma dada região de sua superfície (fig. 18-21-a), atrai elétrons livres deste corpo. Estes elétrons se deslocam até ser atingido o equilíbrio eletrostático quando, então, a carga positiva se apresentará distribuída na superfície do condutor (fig. 18-21-b).

Fig. 18-21: Ilustração esquemática. Mesmo quando um condutor adquire carga positiva, ela fica distribuída em sua superfície, em virtude do movimento dos elétrons livres.



Deve-se observar que este comportamento é característico de um condutor. De fato, se um isolante for atritado em uma determinada região de sua superfície, a carga por ele adquirida não se espalhará, permanecendo em equilíbrio na região onde ela foi gerada. Isto ocorre porque o isolante não possui elétrons livres e, conseqüentemente, as cargas elétricas não poderão se deslocar neste material.

Vimos, portanto, que

se um condutor eletrizado estiver em equilíbrio eletrostático, as cargas elétricas estarão distribuídas em sua superfície.

CAMPO NO INTERIOR E NA SUPERFÍCIE DO CONDUTOR

Como vimos, ao ser atingido o equilíbrio eletrostático, as cargas elétricas em um condutor estão distribuídas em sua superfície e se encontram em repouso.

Nestas condições, a distribuição destas cargas deve ser tal que torne nulo o campo elétrico em qualquer ponto do interior do condutor. De fato, se o campo elétrico no interior do condutor fosse diferente de zero, os elétrons livres aí existentes entrariam em movimento sob a ação deste campo. Como as cargas no condutor estão em equilíbrio, este movimento não pode existir e, portanto, *o campo elétrico deve ser nulo no interior do condutor.*

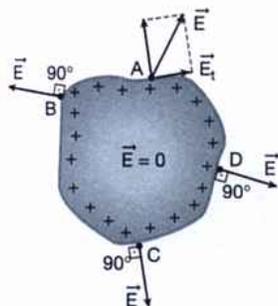


Fig. 18-22: Ilustração esquemática. O vetor campo elétrico na superfície de um condutor eletrizado, em equilíbrio eletrostático, é perpendicular à superfície deste condutor.

Vamos analisar, agora, o que ocorre em pontos da superfície do condutor em equilíbrio eletrostático. Nestes pontos, é possível existir um campo elétrico, sem que isto altere a condição de equilíbrio eletrostático, desde que o vetor \vec{E} seja perpendicular à superfície do condutor, como está mostrado nos pontos B, C e D da fig. 18-22. De fato, se o campo elétrico não fosse perpendicular à superfície, como está desenhado no ponto A da fig. 18-22, ele teria uma componente \vec{E}_t tangente à superfície do condutor. Se esta componente existisse, os elétrons livres ali presentes estariam em movimento sob a ação de \vec{E}_t . Logo, esta componente não pode existir, pois o condutor está em equilíbrio eletrostático. Não existindo uma componente tan-

gencial, o vetor \vec{E} terá que ser perpendicular à superfície do condutor. Evidentemente, atuando nesta direção, o campo não poderá provocar movimento de cargas porque o condutor está envolvido pelo ar que, como sabemos, é um isolante.

Em resumo,

se um condutor eletrizado estiver em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico será nulo em todos os pontos do seu interior, e em pontos da superfície deste condutor \vec{E} será perpendicular a ela (fig. 18-22).

BLINDAGEM ELETROSTÁTICA

Os fatos estudados anteriormente nesta seção são válidos mesmo se o condutor for oco, isto é, se ele apresentar uma cavidade interna, como o bloco metálico mostrado na fig. 18-23. Quando um bloco como este é eletrizado, as cargas elétricas tendem rapidamente a se localizar em sua superfície externa, distribuindo-se de modo a tornar nulo o campo elétrico em todos os pontos do interior do condutor (quer na parte material do bloco, quer em sua cavidade, fig. 18-23).



Esta válvula, usada no circuito de sintonia de um aparelho de TV, está blindada pelo cilindro metálico que a envolve e, assim, protegida de efeitos elétricos externos.

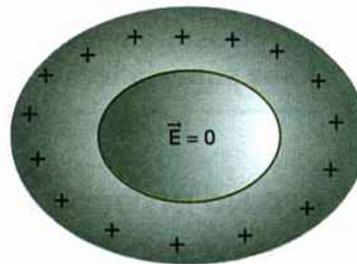


Fig. 18-23: Ilustração esquemática. O campo elétrico no interior de um condutor eletrizado, em equilíbrio eletrostático, é nulo.

Desta maneira, uma cavidade no interior de um condutor é uma região que não será atingida por efeitos elétricos produzidos externamente, pois o campo elétrico nesta cavidade é sempre nulo e não há carga elétrica distribuída em sua parede (a carga se localiza na superfície externa do condutor). Por este motivo, um condutor oco pode ser usado para produzir uma “blindagem eletrostática”: quando queremos proteger um aparelho qualquer contra influências elétricas, nós envolvemos este aparelho com uma capa metálica, isto é, nós o colocamos em uma cavidade no interior de um condutor. Nestas condições, dizemos que o

aparelho está *blindado*, porque nenhum fenômeno elétrico externo afetará o seu funcionamento. Se você observar o interior de um aparelho de TV, por exemplo, poderá notar que algumas válvulas (e outros dispositivos) se apresentam envolvidas por capas metálicas, estando, portanto, blindadas por estes condutores.

O poder de blindagem de uma capa metálica já era conhecido por Faraday que, para comprová-lo experimentalmente, realizou uma experiência que se tornou famosa. Tendo em suas mãos um eletroscópio, Faraday entrou no interior de uma gaiola metálica, a qual foi, a seguir, altamente eletrizada por seu auxiliar (fig. 18-24). Apesar de a superfície da gaiola não ser contínua, ela constitui uma blindagem bastante eficaz, de modo que Faraday nada sofreu, nem observou qualquer deflexão nas folhas do eletroscópio.

Fig. 18-24: Ilustração esquemática. Faraday comprovou o efeito da blindagem eletrostática colocando-se no interior de uma gaiola metálica altamente eletrizada.

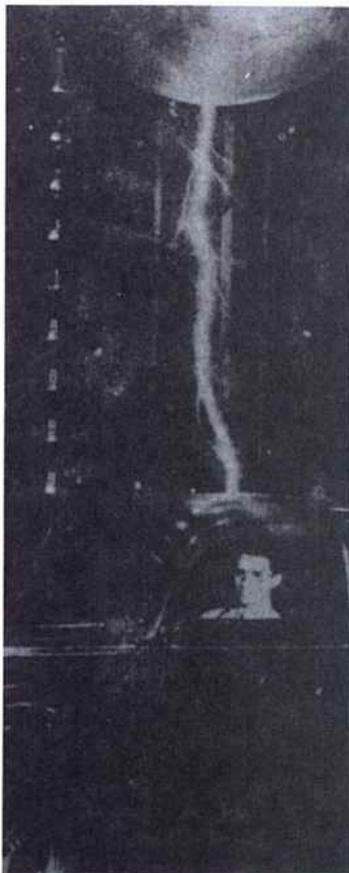
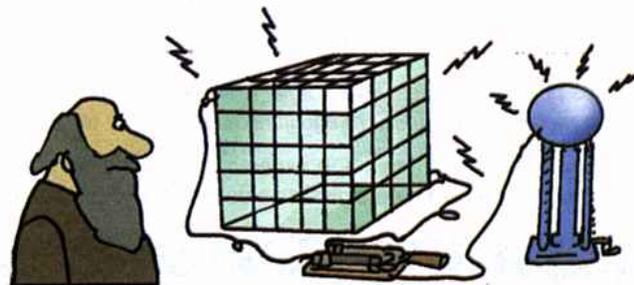


Fig. 18-25: Uma estrutura metálica blindada o seu interior contra efeitos elétricos externos.

A fotografia da fig. 18-25 mostra uma experiência, realizada em um moderno laboratório, que também comprova a existência da blindagem eletrostática. Uma máquina elétrica lança um poderoso raio sobre a capota metálica de um automóvel e o cientista, no interior do carro, encontra-se totalmente protegido contra os efeitos deste raio artificial.

O fio interno do cabo coaxial (no alto) é envolvido por um tecido entremeadado com finos fios metálicos, além de uma capa de alumínio, que podem ser vistos na fotografia. Procura-se, assim, blindar o fio interno contra efeitos elétricos externos.



Prof. Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

Exemplo

Uma esfera metálica oca, de raio R , encontra-se no ar, eletrizada positivamente com uma carga Q .

- a) Desenhe o vetor campo elétrico em um ponto exterior bem próximo da superfície desta esfera.

Vimos que o campo elétrico próximo à superfície de um condutor é perpendicular a esta superfície. Então, no caso da esfera, o vetor \vec{E} deve ter a direção radial, como mostra a fig. 18-26-a.

- b) Qual é a expressão que nos permite calcular a intensidade do campo elétrico em um ponto externo próximo à superfície da esfera?

Sabemos que, para pontos exteriores à esfera, tudo se passa como se sua carga estivesse concentrada em seu centro, isto é, para estes pontos é válida a expressão $E = k_0 Q/r^2$, onde r é a distância do ponto ao centro da esfera.

Então, em um ponto próximo à superfície, temos $r = R$ e, assim, neste ponto, a intensidade do campo será

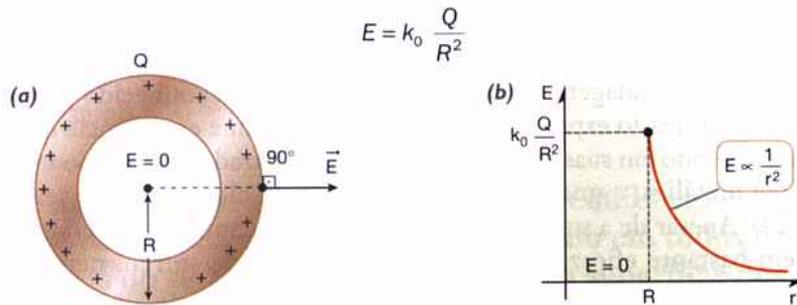


Fig. 18-26: Esquema para o exemplo da seção 18.4.

c) Qual o valor do campo elétrico em pontos do interior da esfera?

Nestes pontos, a expressão $E = k_0 Q / r^2$ não é mais válida, pois sabemos que no interior de um corpo metálico qualquer (em equilíbrio eletrostático) temos $E = 0$.

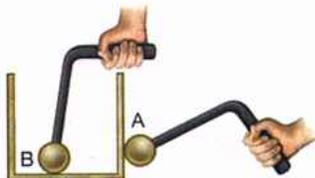
d) Mostre, em um diagrama, o aspecto do gráfico $E \times r$, onde E é a intensidade do campo criado pela esfera e r é a distância do ponto ao centro da esfera.

Este diagrama tem o aspecto mostrado na fig. 18-26-b. Observe que, de $r = 0$ a $r = R$ (interior da esfera) temos $E = 0$. Para pontos exteriores, o campo tem o valor $E = k_0 Q / R^2$ próximo à superfície e diminui à medida que r aumenta (inversamente proporcional ao quadrado de r).

Exercícios de fixação

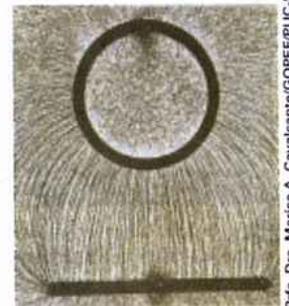
Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

17. Um pedaço de borracha é atritado em uma certa região de sua superfície, adquirindo uma carga negativa naquela região. Esta carga se distribuirá na superfície de borracha? Por quê?
18. Um recipiente metálico, de forma cilíndrica, está eletrizado positivamente. Uma pessoa, segurando por meio de um cabo isolante uma pequena esfera também metálica, encosta esta esfera nos pontos A e B do recipiente, como mostra a figura deste exercício.
 - a) Quando o contato é feito em A, a esfera se eletrizará positivamente, negativamente ou não irá adquirir carga elétrica?
 - b) Quando o contato é feito em B, a esfera se eletrizará? Por quê?



Exercício 18.

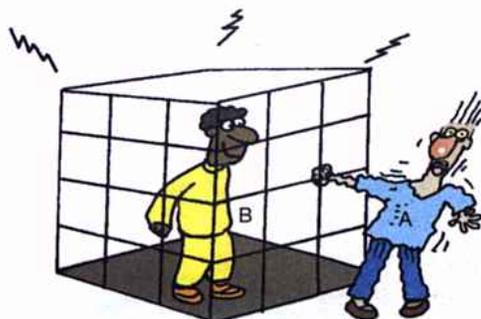
19. A figura deste exercício é uma fotografia que mostra um cilindro oco e uma placa, ambos metálicos, eletrizados com cargas de sinais contrários. As linhas de força do campo elétrico criado por estes dois objetos podem ser vistas na fotografia graças a pequenas fibras suspensas em óleo que se orientam nas direções destas linhas de força. Observe a figura e responda:
 - a) No interior do cilindro as fibras se apresentam orientadas? Por quê?
 - b) Qual o ângulo que as linhas de força formam com cada uma das superfícies dos objetos? Por quê?



Exercício 19.

20. Uma gaiola metálica possui uma carga em equilíbrio eletrostático. Duas pessoas, A e B, encontram-se em contato com a gaiola nas posições mostradas na figura deste exercício.

- a) Por que os cabelos de A se apresentam eriçados?
- b) Por que em B este efeito não é observado?



Exercício 20.

21. Um estudante verificou que a presença de uma carga Q estava perturbando o funcionamento de um aparelho elétrico P (próximo de Q). Desejando evitar estas perturbações, ele envolveu a carga Q com uma cúpula metálica, como mostra a figura deste exercício. Agindo desta maneira, ele não conseguiu seu objetivo. Como deveria ter ele procedido (sem afastar Q do aparelho)?



Exercício 21.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

18.5. Rigidez dielétrica – poder das pontas

UM ISOLANTE PODE SE TORNAR CONDUTOR

Como sabemos, os dielétricos (ou isolantes) são substâncias nas quais os elétrons estão presos aos núcleos dos átomos, isto é, não existem cargas livres na estrutura interna destes materiais.

Suponha, entretanto, que um campo elétrico seja aplicado a um corpo isolante colocando-o, por exemplo, entre duas placas eletrizadas, como mostra a fig. 18-27. Nestas condições, uma força elétrica atuará sobre todos os elétrons do isolante, tendendo a arrancá-los de seus átomos (veja a fig. 18-27). Se a intensidade do campo elétrico não for muito grande, os elétrons continuarão ligados aos núcleos de seus átomos e a força elétrica provocará apenas uma polarização do dielétrico, como vimos no capítulo anterior.

Aumentando-se a intensidade do campo aplicado ao isolante, o valor da força que atua nos elétrons também aumenta. É fácil prever que, para um certo valor do campo elétrico, esta força será suficiente para arrancar um ou mais elétrons de cada átomo, isto é, eles passarão a ser elétrons livres. Então, como o material possui agora um número muito grande de elétrons livres em sua estrutura, ele terá se transformado em um bom condutor de eletricidade. Este processo pode ocorrer com qualquer isolante, dependendo apenas do valor do campo elétrico aplicado, como veremos a seguir.

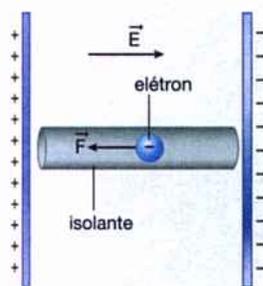


Fig. 18-27: Representação esquemática de substância isolante colocada em um campo elétrico uniforme.

O QUE É RIGIDEZ DIELÉTRICA

O maior valor do campo elétrico que pode ser aplicado a um isolante sem que ele se torne condutor é denominado *rigidez dielétrica do material*. A rigidez dielétrica varia de um material para outro, pois, como era de esperar, alguns

materiais suportam campos muito intensos mantendo-se ainda como isolantes, enquanto outros tornam-se condutores mesmo sob a ação de campos elétricos de intensidades relativamente baixas.

Assim, verifica-se experimentalmente que a rigidez dielétrica do vidro pirex é 14×10^6 N/C, enquanto a da mica (malacacheta) pode atingir 100×10^6 N/C. Já a rigidez dielétrica do ar é bem menor, valendo cerca de 3×10^6 N/C. Então, enquanto a intensidade do campo elétrico aplicado a uma massa de ar for inferior a 3×10^6 N/C, este ar será isolante. Quando o campo aplicado ultrapassar este valor, o ar se tornará um condutor.

A CENTELHA ELÉTRICA

Estas idéias permitem-nos entender um fenômeno que observamos muito freqüentemente em nossa vida diária: uma centelha elétrica que salta de um corpo eletrizado para outro, colocado próximo a ele. Consideremos, por exemplo, duas placas eletrizadas com cargas de sinais contrários, separadas por uma camada de ar, como mostra a fig. 18-28. Se o campo elétrico criado por estas placas for inferior a 3×10^6 N/C, o ar entre elas permanecerá isolante e impedirá que haja passagem de carga de uma placa para outra. Entretanto, se o campo elétrico tornar-se maior do que este valor, isto é, se a intensidade do campo ultrapassar o valor da rigidez dielétrica do ar, este se tornará condutor. Como dissemos, nestas condições o ar possuirá um grande número de elétrons livres, apresentando íons positivos e negativos. Estes íons são atraídos pelas placas e movimentam-se através do ar fazendo com que haja uma descarga elétrica de uma placa para a outra (fig. 18-28). Esta descarga vem acompanhada de uma centelha (emissão de luz) e de um pequeno ruído (um estalo) causado pela expansão do ar que se aquece com a descarga elétrica.

Portanto, sempre que observamos uma “faísca elétrica” saltar de um corpo para outro (do pente para o cabelo, de uma roupa de náilon para o corpo, entre os terminais de um interruptor elétrico etc.), podemos concluir que a rigidez dielétrica do ar situado entre estes corpos foi ultrapassada e ele se tornou um condutor.

O RELÂMPAGO E O TROVÃO

A situação que acabamos de analisar é semelhante ao que ocorre no aparecimento de um raio em uma tempestade que, como você sabe, vem acompanhado de um relâmpago e de um trovão.

Durante a formação de uma tempestade, verifica-se que ocorre uma separação de cargas elétricas, ficando as nuvens mais baixas eletrizadas negativamente (como a nuvem A da fig. 18-29), enquanto as mais altas adquirem cargas positivas (nuvem B da fig. 18-29). Várias experiências, algumas realizadas por pilotos voando perigosamente através de tempestades, comprovaram a existência desta separação de cargas (os processos que provocam esta separação são complicados e não nos preocuparemos em descrevê-los).

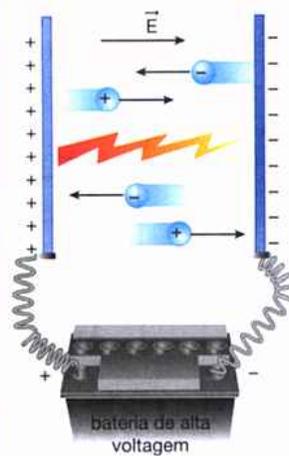
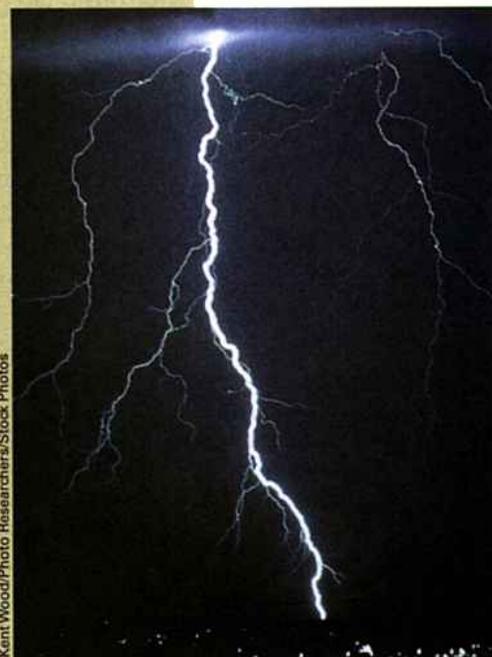


Fig. 18-28: Ilustração esquemática. Quando o campo elétrico entre as placas excede o valor da rigidez dielétrica do ar, este se torna condutor.



Observe que o raio se estabelece de forma sinuosa, buscando sempre o caminho de melhor condutividade elétrica.



Fig. 18-29: O relâmpago é uma enorme centelha elétrica que salta de uma nuvem para outra ou de uma nuvem para a Terra.

Analisando a fig. 18-29, podemos concluir que entre as nuvens A e B existe um campo elétrico. Além disso, estando a nuvem A mais baixa, ela induz uma carga positiva na superfície da Terra e, portanto, entre A e a Terra estabelece-se também um campo elétrico. À medida que vão se avolumando as cargas elétricas nas nuvens, as intensidades destes campos elétricos vão aumentando, acabando por ultrapassar o valor da rigidez dielétrica do ar. Quando isto acontece, o ar torna-se condutor e uma enorme centelha elétrica (relâmpago) salta de uma nuvem para outra ou de uma nuvem para a Terra. Esta descarga elétrica aquece o ar, provocando uma expansão que se propaga em forma de uma onda sonora, originando o trovão. Nosso ouvido é atingido não só pela onda sonora que chega diretamente da descarga, como também pelas ondas refletidas em montanhas, prédios etc. Por este motivo, geralmente não percebemos o trovão como um estalo único mas com aquele ribombar característico.*

O QUE É “PODER DAS PONTAS”

Um fenômeno interessante, relacionado com o conceito de rigidez dielétrica e que examinaremos a seguir, denomina-se *poder das pontas*. Há mais de duzentos anos os cientistas observaram que um condutor que apresenta em sua superfície uma região pontiaguda dificilmente se mantém eletrizado, pois a carga elétrica fornecida a ele escapa através da ponta. Aqueles cientistas não conseguiram uma explicação satisfatória para este fato e simplesmente o denominaram *poder das pontas*.

Atualmente sabemos que o fenômeno do poder das pontas ocorre porque, em um condutor eletrizado, a carga tende a se acumular nas regiões pontiagudas. Na fig. 18-30 procuramos ilustrar este fato, mostrando um bloco metálico com uma carga elétrica que, como sabemos, distribui-se em sua superfície. Observe, entretanto, que esta distribuição não é uniforme: em P , onde há uma ponta acentuada, há um grande acúmulo de cargas elétricas e em R , que é uma região quase plana, a concentração de cargas é muito menor. Em virtude desta distribuição, o campo elétrico próximo às pontas do condutor é muito mais intenso do que nas proximidades das regiões mais planas. Na fig. 18-30, os vetores que representam o campo elétrico em cada ponto próximo ao condutor foram traçados de acordo com este resultado.

Assim, se aumentarmos continuamente a carga elétrica no condutor, a intensidade do campo elétrico em torno dele aumentará também gradativamente. É fácil perceber, então, que na região mais pontiaguda (como P , na

*Esta é a explicação do ribombar de um trovão que encontramos em alguns textos, como, por exemplo, em “The flying circus of Physics”, de J. Walker.

Em outros textos, como na *Enciclopédia Britânica*, este fenômeno é atribuído a uma causa diferente: a descarga elétrica ocorre ao longo de uma espécie de canal, que se forma na atmosfera no momento do raio, e que atinge, às vezes, vários quilômetros de comprimento. Uma pessoa, na Terra, recebe inicialmente o som proveniente da parte mais baixa da descarga e, sucessivamente, os sons que se originam nas partes do canal mais afastadas da pessoa. Daí, o fato de o trovão poder ser ouvido durante um certo intervalo de tempo. Provavelmente, as duas causas apontadas sejam ambas responsáveis pelo retumbar do trovão.

fig. 18-30) o valor da rigidez dielétrica do ar será ultrapassado, antes que isto ocorra nas demais regiões. Portanto, será nas proximidades da região pontiaguda que o ar se tornará condutor e, conseqüentemente, será através da ponta que a carga do bloco metálico se escoará.

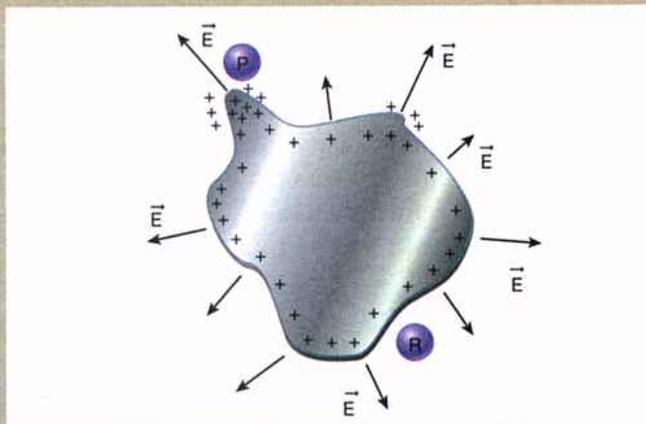


Fig.18-30: Ilustração esquemática. O campo elétrico nas pontas de um condutor eletrizado é maior do que nas regiões mais planas.

Mesmo que um corpo metálico esteja pouco eletrizado, o campo elétrico próximo a uma ponta pode ser muito elevado. É por isso que quando um condutor possui uma ponta muito acentuada, não conseguimos dar a ele uma carga apreciável, pois o campo elétrico próximo a esta ponta facilmente ultrapassa a rigidez dielétrica do ar. Para que isto não ocorra, quando desejamos acumular uma certa carga elétrica na superfície de um condutor, devemos dar a ele uma forma arredondada (sem pontas).

COMO FUNCIONAM OS PÁRA-RAIOS

O poder das pontas encontra uma importante aplicação na construção dos pára-raios que, como você deve saber, foram inventados pelo cientista americano Benjamin Franklin no século XVIII.

Este cientista observou que os relâmpagos eram muito semelhantes às centelhas elétricas que ele via saltar entre dois corpos eletrizados em seu laboratório. Suspeitou, então, que os raios fossem enormes centelhas causadas por eletricidade que, por algum processo, desenvolvia-se nas nuvens. Para verificar sua hipótese, ele realizou uma perigosa experiência que se tornou famosa e que a fig. 18-31 procura ilustrar. Durante uma tempestade, Franklin empinou um papagaio de papel na tentativa de transferir a eletricidade, que ele acreditava existir nas nuvens, para alguns aparelhos de seu laboratório. Ligando a linha do papagaio a estes aparelhos, Franklin verificou que eles adquiriam carga elétrica, comprovando que as nuvens realmente estavam eletrizadas.

Conhecendo o fenômeno do poder das pontas, Benjamin Franklin teve, então, a idéia de construir um dispositivo que exercesse uma proteção contra os efeitos desastrosos que os raios costumam provocar. Este dispositivo, o pára-raios, consiste essencialmente em uma ou várias pontas metálicas, e deve ser colocado no ponto mais elevado do local a ser protegido. O pára-raios é ligado à



Fig.18-31: Franklin, empinando um papagaio de papel, conseguiu captar a eletricidade desenvolvida nas nuvens.

tenha cuidado! Atenção! Não solte pipas próximo a faixões elétricas nem em dias de chuvas e com relâmpagos.



Fig. 18-32: Ilustração esquemática. O para-raios exerce sua ação protetora contra os danos causados pelos raios.

Terra por meio de um bom condutor (fio metálico grosso), que normalmente termina em uma grande placa enterrada no solo, como mostra a fig. 18-32.

Quando uma nuvem eletrizada passa sobre o local onde o para-raios foi colocado, o campo elétrico estabelecido entre a nuvem e a Terra torna-se muito intenso nas proximidades de suas pontas. Então, o ar em torno das pontas ioniza-se, tornando-se condutor e fazendo com que a descarga elétrica se processe através destas pontas. Em outras palavras, há maior probabilidade de o raio “cair” (como se diz popularmente) no para-raios do que em outro local da vizinhança. Naturalmente, como o para-raios está ligado ao solo, a carga elétrica que ele recebe da nuvem é transferida para a Terra sem causar danos. Estudos estatísticos mostram que a ação protetora do para-raios se estende a uma distância aproximadamente igual ao dobro de sua altura. Observe o esquema:



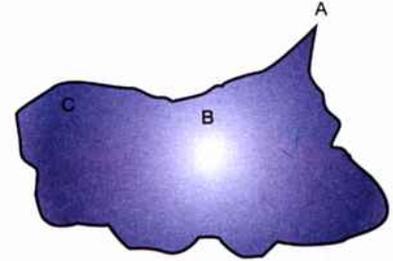
los de fixação exercícios de fixação exercícios de fixaç

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

22. a) Um material isolante elétrico pode tornar-se um condutor. Em que condições isto ocorre?
 b) O que se denomina “rigidez dielétrica” de um isolante?
23. Observe os dados fornecidos nesta seção e responda:
 a) Qual a explicação para o fato de a mica ter sido usada durante muito tempo como isolante elétrico em diversos aparelhos (como, por exemplo, em capacitores mais antigos)?
 b) Você poderia usar um vidro pirex como isolante elétrico em um aparelho no qual ele estaria submetido a um campo elétrico de $2,0 \times 10^7$ N/C? Por quê?
24. Sabe-se que quando uma esfera condutora, no ar, recebe uma carga elétrica, que vai sendo aumentada gradualmente, há um limite para o valor da carga que a esfera pode reter. Após este limite ser atingido:
 a) O que acontece com a carga que é transferida à esfera?
 b) O que se pode afirmar sobre o valor do campo elétrico na superfície da esfera?
25. a) Em um dia em que a umidade relativa do ar é elevada, observa-se que o limite de carga que uma esfera metálica pode receber (mencionado no exercício anterior) torna-se muito menor. Que conclusão podemos tirar sobre a rigidez dielétrica do ar nestas condições?

- b) Nos laboratórios de Física, quando se deseja que uma esfera possa acumular cargas elétricas elevadas, ela é mergulhada em óleo. Que conclusão você pode tirar sobre a rigidez dielétrica do óleo?
26. a) Quando ocorre um raio em uma tempestade, a carga elétrica que é transferida de uma nuvem para a Terra é de cerca de 10 C. Em uma pequena centelha que salta no interruptor de luz, quando se abre ou se fecha um circuito, a carga transferida é de apenas 10^{-8} C, aproximadamente. Quantas vezes aquela carga é maior do que esta? (Expresse este número em palavras.)
- b) Um estudante, ao perceber o grande valor da relação entre as cargas obtida na questão (a), opinou que o campo elétrico na região do raio seria muitas vezes maior do que na região onde ocorre a centelha. Você concorda com esta conclusão? Explique. (Considere o ar em condições semelhantes nas duas regiões.)
27. Considere um corpo metálico, no ar, com a forma mostrada na figura deste exercício. Eletrizando-se esse corpo, transferindo-se para ele uma carga que é aumentada gradualmente, observa-se que há um limite para a carga que pode ser armazenada no corpo (como ocorreu na esfera mencionada no exercício 24).
- a) Após este limite ser atingido, por qual região do corpo a carga escapa para o ar? Por quê?
- b) Suponha que uma esfera metálica, no ar, tenha uma superfície externa de área igual à do corpo

mostrado na figura deste exercício. A carga máxima que pode ser armazenada nesta esfera será maior, menor ou igual aquela que pode ser armazenada no corpo? Explique.



Exercício 27.

28. Uma pessoa encontra-se em um campo plano, quando é surpreendida por uma tempestade. Para se proteger da chuva, ela se esconde sob a copa de uma árvore isolada no meio do campo. Isto é arriscado. Por quê?
29. Um pára-raios, no alto da torre de uma igreja, está situado a 30 m de altura. Três pessoas, durante uma tempestade, estão às seguintes distâncias da base da torre: 50 m, 40 m e 80 m. Há alguma delas que não está protegida pelo pára-raios? Por quê?
30. Há uma crença popular segundo a qual "um raio não cai nunca duas vezes em um mesmo lugar". Lembrando-se do "poder das pontas" e do que estudou nesta seção sobre a formação dos raios, você julga que esta crença tem algum fundamento científico?

Revisão Revisão Revisão Revisão Revisão Revisão

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Explique como devemos proceder para verificar se existe um campo elétrico em um certo ponto do espaço.
- Definir, em módulo, direção e sentido, o vetor campo elétrico \vec{E} em um certo ponto do espaço.
 - Qual é, no S.I., a unidade de medida da intensidade do campo elétrico?
 - Conhecendo-se a intensidade \vec{E} do campo elétrico em um ponto e o valor de uma carga q colocada neste ponto, como podemos calcular o valor da força elétrica que atua em q ?
- Suponha que seja conhecido o vetor \vec{E} em um ponto. Diga em que sentido uma carga elétrica, colocada neste ponto, tende a se movimentar, se o sinal desta carga for:
 - Positivo.
 - Negativo.
- Escreva a expressão que nos permite calcular a intensidade do campo elétrico criado por uma carga puntual. Explique o significado de cada símbolo que aparece nesta expressão.
 - Descreva como devemos proceder para calcular o campo elétrico \vec{E} criado por um ponto P , por várias cargas puntuais.

5. a) Descreva com suas palavras o procedimento ilustrado na figura 18-10-a para calcular o campo elétrico criado em P pela carga distribuída na superfície da esfera.
 - b) Escreva a expressão que nos permite calcular a intensidade do campo elétrico criado por uma esfera eletrizada em pontos exteriores a ela. Explique o significado de cada símbolo que aparece nesta expressão.
 - c) Qual é a intensidade do campo elétrico no interior de uma esfera metálica maciça eletrizada? E se a esfera for oca?
 - d) Sendo E a intensidade do campo criado por uma esfera eletrizada e r a distância de um ponto ao centro desta esfera, faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $E \times r$ (iniciar em $r = 0$).
6. a) Conhecendo-se uma linha de força de um campo elétrico, explique como podemos determinar a direção e o sentido do vetor \vec{E} em cada ponto desta linha.
 - b) Como podemos obter informações sobre a intensidade de um campo elétrico observando um diagrama de suas linhas de força?
7. a) O que é um campo elétrico uniforme?
 - b) Faça um desenho mostrando uma distribuição de cargas que nos fornece um campo elétrico uniforme.
- c) Mostre, no desenho da questão (b), a direção e o sentido do vetor \vec{E} .
8. Faça um desenho mostrando o aspecto das linhas de força:
 - a) Do campo elétrico criado por uma carga puntual positiva.
 - b) Do campo elétrico criado por uma carga puntual negativa.
 - c) De um campo uniforme.
9. Considere um condutor eletrizado em equilíbrio eletrostático.
 - a) O que significa dizer que o condutor está em equilíbrio eletrostático?
 - b) Onde estão distribuídas as cargas elétricas neste condutor?
 - c) Qual é a intensidade do campo elétrico no interior deste condutor?
 - d) Qual é a direção do vetor \vec{E} em pontos exteriores ao condutor, próximos à sua superfície?
10. a) Explique com suas palavras o que você entende por "blindagem eletrostática".
 - b) Descreva a experiência da "gaiola de Faraday".

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

Na seção 18.4 vimos que a carga elétrica em um corpo metálico eletrizado se distribui em sua superfície externa. Você poderá verificar este fato realizando a experiência seguinte:

- 1ª) Tome um recipiente metálico (como uma caneca, um copo ou uma pequena lata) e coloque-o sobre um suporte de isopor, que é um bom isolante elétrico (veja a figura desta experiência).



Primeira experiência.

Agostinho de Paula

- 2ª) Corte algumas tiras bem finas de papel de seda e prenda algumas destas tiras na parte externa do recipiente e outras em sua parte interna, como mostra a figura.
- 3ª) Eletrize um pente passando-o em seus cabelos. Encostando o pente no recipiente, este ficará eletrizado por contato, como você já sabe. Repita esta operação algumas vezes, para que o recipiente adquira uma carga apreciável.
- 4ª) Observe que as tiras da parte externa são repelidas pela parede do recipiente, o que não ocorre com as tiras da parte interna. Explique por que isto acontece.

Segunda experiência

O fenômeno da *blindagem eletrostática* foi também analisado na seção 18.4. Para observar e analisar este fenômeno, proceda da seguinte maneira:

- 1ª) Coloque pequenos pedaços de papel sobre uma placa de isopor e aproxime deles um pente atritado nos cabelos. Como você já sabe, o pente atrairá os pedaços de papel.
- 2ª) Entre o pente e os pedaços de papel interponha uma pequena peneira (coador) de plástico, como mostra a

figura desta experiência. Se este coador estiver limpo e seco (bom isolante), você verá que os pedaços de papel continuarão a ser atraídos pelo pente eletrizado. Então, o isolante produziu uma blindagem eletrostática sobre os pedaços de papel?

3º) Substitua a peneira de material isolante por uma peneira metálica. Os pedaços de papel, neste caso, serão ainda atraídos pelo pente?

Mantendo o pente em sua posição, retire a peneira metálica e observe que o pente atrairá os pedaços de papel. Então, os pedaços de papel foram blindados eletrostaticamente pelo metal?

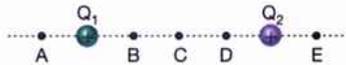


Agostinho de Paula

Segunda experiência.

problemas e testes problemas e testes problemas e testes

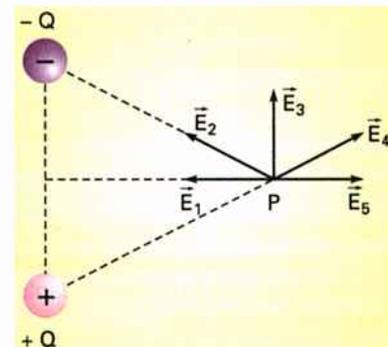
- Deseja-se determinar o campo elétrico que deve ser aplicado a um elétron de tal modo que a força exercida pelo campo equilibre o peso desta partícula.
 - Sabendo-se que a massa do elétron é $9,1 \times 10^{-31}$ kg, qual é o seu peso? (Considere $g = 10$ m/s².)
 - Qual deve ser a direção e o sentido do campo elétrico procurado?
 - Calcule a intensidade que deve ter este campo elétrico (sabe-se que a carga do elétron vale $1,6 \times 10^{-19}$ C).
- Considere as duas cargas pontuais positivas Q_1 e Q_2 mostradas na figura deste problema. Sabe-se que $Q_1 > Q_2$ e que o campo elétrico criado por estas cargas é nulo em um dos pontos mostrados na figura. Este ponto só pode ser:
 - A
 - B
 - C
 - D
 - E



Problema 2.

- No problema anterior, suponha que a carga Q_2 seja negativa (considere ainda o módulo de Q_1 maior do que o módulo de Q_2). Neste caso, o campo elétrico criado pelas duas cargas só poderia ser nulo no ponto:
 - A
 - B
 - C
 - D
 - E

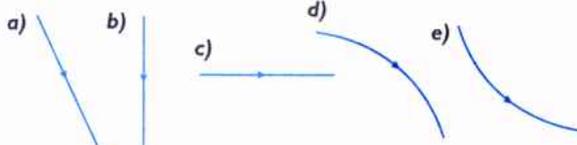
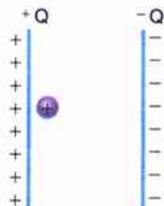
- Dois cargas pontuais, de mesmo valor e de sinais contrários, criam um campo elétrico no ponto P mostrado na figura deste problema. Qual dos vetores indicados em P melhor representa o campo elétrico neste ponto?
 - \vec{E}_1
 - \vec{E}_2
 - \vec{E}_3
 - \vec{E}_4
 - \vec{E}_5



Problema 4.

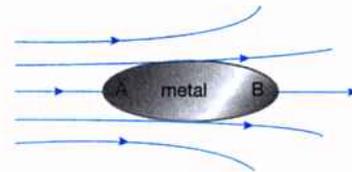
- Uma esfera metálica, de 20 cm de raio, está eletrizada positivamente com uma carga de $2,0 \mu\text{C}$. Determinar a intensidade do campo elétrico criado pela carga desta esfera nos seguintes pontos:
 - No centro da esfera.
 - A 10 cm do centro da esfera.
 - Em um ponto exterior, muito próximo da superfície da esfera.
 - Em um ponto exterior, a 10 cm da superfície da esfera.

6. Verifica-se que em pontos da atmosfera, próximos à superfície da Terra, existe um campo elétrico de aproximadamente 100 N/C, dirigido verticalmente para baixo. Sabendo-se que este campo é devido a uma carga elétrica existente na Terra, responda:
- Qual é o sinal desta carga?
 - Qual é o seu valor? (Considere o raio da Terra igual a 6000 km.)
7. O material que constitui a Terra nos permite considerá-la como um condutor de eletricidade. Nestas condições:
- Onde se localiza a carga elétrica que você calculou no problema anterior?
 - Considerando que a área da superfície terrestre vale cerca de $4 \times 10^{14} \text{ m}^2$, calcule quantos μC de carga elétrica existem em cada 1 m^2 da superfície da Terra.
8. Considere as informações relativas ao campo elétrico terrestre fornecidas no problema 6. Uma pequena esfera eletrizada poderia se manter em equilíbrio, flutuando no ar, com seu peso equilibrado pela ação deste campo. Supondo a massa desta esfera igual a 1,5 miligramas e $g = 10 \text{ m/s}^2$, responda:
- Qual deve ser o sinal da carga na esfera?
 - Qual deve ser o valor desta carga?
9. Considere um corpo metálico eletrizado envolvido pelo ar atmosférico. Sabe-se que, se o campo elétrico próximo à superfície deste corpo tornar-se superior a $3 \times 10^6 \text{ N/C}$, o ar passa a se comportar como um condutor e, então, o corpo metálico se descarrega. Baseando-se nestas informações, calcule qual é a maior carga que pode ser dada a uma esfera metálica, de raio $R = 10 \text{ cm}$, no ar, sem que ela se descarregue.
10. Uma partícula com carga positiva é abandonada entre duas placas planas, verticais, eletrizadas, como mostra a figura deste problema. Considerando que o peso desta partícula não é desprezível, a trajetória que ela irá descrever será melhor representada por:



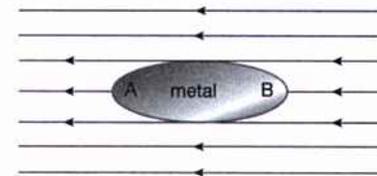
Problema 10.

11. Um elétron é acelerado, a partir do repouso, por um campo elétrico uniforme $E = 5,0 \times 10^5 \text{ N/C}$. Consulte a tabela no final deste volume para obter os valores da carga e da massa do elétron e determine:
- A aceleração adquirida pelo elétron.
 - O tempo que o elétron gasta para atingir uma velocidade igual a 10% da velocidade da luz.
12. Considere um corpo metálico descarregado, AB, colocado em um campo elétrico cujas linhas de força estão mostradas na figura deste problema.
- Em virtude da indução eletrostática no corpo metálico, qual será o sinal da carga que aparece em sua extremidade A? E em B?
 - A intensidade do campo elétrico nas proximidades de A é maior, menor ou igual à intensidade próxima de B?
 - Quais os sentidos das forças elétricas \vec{F}_A e \vec{F}_B que atuarão nas extremidades A e B?
 - Então, sob a ação dessas forças, o corpo permanecerá em repouso, tenderá a se deslocar para a direita ou tenderá a se deslocar para a esquerda?



Problema 12.

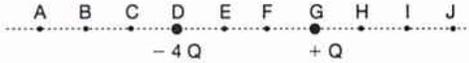
13. Responda às questões formuladas no problema anterior supondo, agora, que o corpo metálico se encontra em um campo elétrico cujas linhas de força estão mostradas na figura deste problema.



Problema 13.

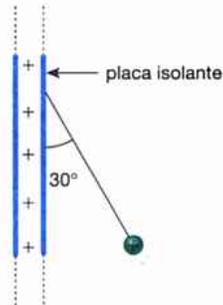
14. Em uma repetição das experiências de Millikan (veja o *Tópico Especial* do capítulo seguinte), foi usada uma pequena gota de óleo, eletrizada negativamente, cuja massa era de $2,4 \times 10^{-15} \text{ kg}$. Verificou-se que, para equilibrar o peso desta gota, era necessário aplicar a ela um campo elétrico vertical de $5,0 \times 10^4 \text{ N/C}$. Quantos elétrons havia, em excesso, nesta gota de óleo (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$)?
15. Um pêndulo simples está oscilando em uma região onde existe um campo elétrico uniforme, vertical, dirigido de cima para baixo. Inicialmente, a esfera do pêndulo não está eletrizada. Dizer se o período deste pêndulo aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração se sua esfera for eletrizada com uma carga:
- Positiva.
 - Negativa.

16. Os pontos assinalados na figura deste problema estão igualmente espaçados. Em qual deles é nulo o campo elétrico criado pelas duas cargas puntuais mostradas nesta figura?



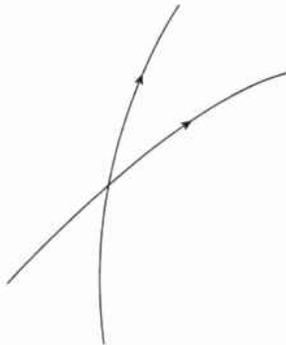
Problema 16.

17. Uma placa isolante muito grande, uniformemente eletrizada (como aquela mostrada na figura deste problema), cria, em pontos próximos a ela, um campo elétrico uniforme perpendicular à sua superfície. Suponha que esta placa esteja na posição vertical, tendo presa a ela, por meio de um fio, uma pequena esfera eletrizada, em equilíbrio, na posição indicada na figura. Sendo 10 g a massa da esfera e $3,0 \mu\text{C}$ a sua carga, calcule a intensidade do campo criado pela placa (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$).



Problema 17.

18. Um estudante representou duas linhas de força de um mesmo campo elétrico, da maneira mostrada na figura deste problema. Há um erro neste diagrama. Qual é este erro? Por quê?

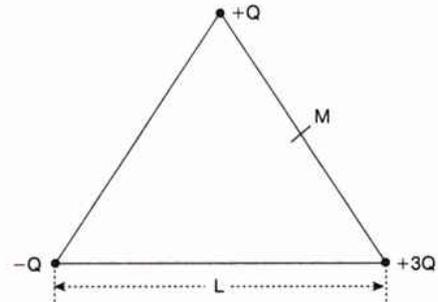


Problema 18.

19. Em um átomo de hidrogênio, considere a distância do próton ao elétron igual a $5 \times 10^{-11} \text{ m}$.
- Qual é a intensidade do campo elétrico, criado pelo próton, em um ponto da órbita do elétron?
 - O campo calculado em (a) é maior ou menor do que a rigidez dielétrica do ar? Quantas vezes?
 - Usando a resposta da questão (a), calcule o módulo da força que atua no elétron.

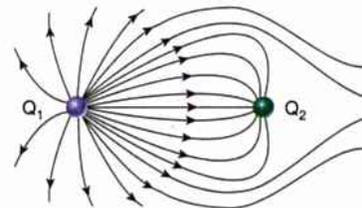
20. Duas cargas puntuais positivas, $Q_1 = 1,5 \times 10^{-8} \text{ C}$ e $Q_2 = 6,0 \times 10^{-8} \text{ C}$, estão separadas de 15 cm. Determine a posição do único ponto em que o campo elétrico criado pelas duas cargas é nulo.

21. As três cargas elétricas puntuais, mostradas na figura deste problema, estão situadas nos vértices de um triângulo equilátero de lado L . Determine a intensidade do campo elétrico que elas estabelecem no ponto M , indicado na figura (ponto médio do lado). Apresente a resposta em termos de k_0 , Q e L .



Problema 21.

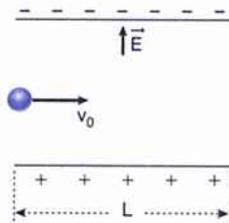
22. Na figura deste problema estão representadas as linhas de força do campo elétrico criado por duas cargas puntuais. Observe a figura e responda:



Problema 22.

- Quais os sinais das cargas Q_1 e Q_2 ?
 - O módulo de Q_1 é maior, menor ou igual ao de Q_2 ?
 - A intensidade do campo elétrico nas proximidades de Q_1 é maior, igual ou menor do que nas proximidades de Q_2 ?
23. Suponha que um elétron tenha sido abandonado em uma região onde existe um campo elétrico uniforme, cujo valor é $E = 5,0 \times 10^3 \text{ N/C}$. Sabe-se que a razão q/m (carga/massa) do elétron vale $1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$. Usando apenas estes dados, diga quais das grandezas seguintes, referentes ao elétron, você poderá calcular e determine os seus valores:
- sua massa;
 - a força que atua sobre ele;
 - sua carga;
 - a aceleração que ele adquire.

24. Duas placas condutoras eletrizadas de comprimento $L = 6,0$ cm, cada uma, estão dispostas como mostra a figura deste problema. O campo elétrico no espaço entre as placas vale $E = 1,8 \times 10^4$ N/C. Um elétron é lançado paralelamente às placas, com velocidade $v_0 = 3,0 \times 10^7$ m/s.
- Esboce a trajetória descrita pelo elétron, enquanto ele atravessa o espaço entre as placas.
 - Quanto tempo o elétron gasta para se deslocar desde o ponto de lançamento até emergir do outro lado?
 - Calcule o desvio transversal sofrido pelo elétron ao atravessar o espaço entre as placas.



Problema 24.

25. Duas esferas condutoras, A e B, eletrizadas positivamente, de raios R_A e R_B sendo $R_A > R_B$, criam campos elétricos de mesma intensidade em pontos igualmente distantes de seus respectivos centros.
- A carga na esfera A é maior, menor ou igual à carga na esfera B?
 - A densidade superficial de carga (carga total/área da esfera) da esfera A é maior, menor ou igual à da esfera B?
 - Sendo E_A e E_B as intensidades dos campos nas proximidades das superfícies das esferas A e B, dizer se E_A é maior, menor ou igual a E_B .

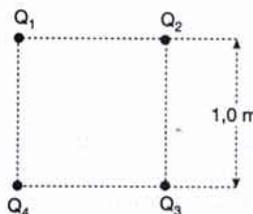
26. Na fig. 18-14, suponha que estivéssemos estudando o campo elétrico, para as duas situações mostradas, em uma região bastante afastada das cargas.
- A intensidade do campo, nesta região, seria maior para a configuração da figura (a) ou da figura (b)?
 - No caso da figura (b), como seria o aspecto das linhas de força nesta região?
27. Já vimos que quando uma esfera metálica, no ar, está sendo eletrizada, de maneira que sua carga seja aumentada gradualmente, após um certo tempo a carga da esfera atinge um valor máximo (apesar de continuarmos fornecendo carga a ela). Em que região da superfície da esfera a carga está escapando para o ar? Por quê?
28. No problema 20, uma carga elétrica q , positiva, é colocada no ponto onde o campo elétrico é nulo.
- Considere q deslocada ligeiramente de sua posição de equilíbrio, ao longo da linha que une Q_1 e Q_2 (para um lado ou para o outro). A carga q tende a voltar para a posição de equilíbrio (equilíbrio estável) ou tende a se afastar mais desta posição (equilíbrio instável)?
 - Responda à questão (a) supondo, agora, que a carga q foi deslocada ligeiramente em direção perpendicular à linha que une Q_1 e Q_2 .
29. Responda às questões (a) e (b) do problema anterior, supondo que a carga q seja negativa.
30. Considere duas esferas metálicas de mesmo raio, uma oca e a outra maciça, ambas no ar. A carga elétrica máxima que pode ser armazenada na esfera maciça é maior, menor ou igual à que pode ser armazenada na esfera oca? Por quê?

ular questões de vestibular questões de vestibula

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

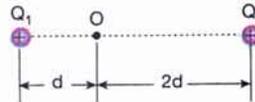
res problemas suplementares problemas suplemer

1. Nos vértices de um quadrado, de lado igual a 1,0 m, são colocadas cargas elétricas Q_1, Q_2, Q_3 e Q_4 da maneira mostrada na figura deste problema. Sabendo-se que $Q_1 = +1,0 \times 10^{-7}$ C, $Q_2 = +2,0 \times 10^{-7}$ C, $Q_3 = -1,0 \times 10^{-7}$ C e $Q_4 = -2,0 \times 10^{-7}$ C, calcule a intensidade do campo elétrico no centro do quadrado (suponha as cargas no ar).



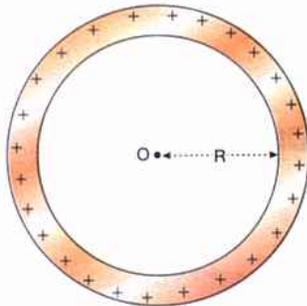
Problema suplementar 1.

- Na figura 18-14-b suponha que uma das cargas seja $+Q$ e a outra $+2Q$. Faça um esquema das linhas de força do campo elétrico criado por essas cargas.
- No problema 4 (da série Problemas e Testes, deste capítulo) suponha que o módulo da carga Q seja $2,0 \times 10^{-8}$ C. Sendo de 20 cm a distância entre as cargas, calcule a intensidade do campo elétrico no ponto P situado a uma distância de 30 cm de cada carga.
- Duas cargas elétricas pontuais, de mesmo módulo e com sinais opostos, encontram-se em dois dos vértices de um triângulo equilátero. No ponto médio entre estes dois vértices, o módulo do campo elétrico resultante devido às duas cargas vale E_0 . Qual é o módulo do campo elétrico, E , criado por essas cargas no terceiro vértice do triângulo? (Apresente a resposta em função de E_0 .)
- Na figura deste problema, Q_1 e Q_2 representam duas cargas puntiformes de mesmo sinal. Sabendo-se que o vetor campo elétrico resultante produzido por essas cargas em O é nulo, determine a relação entre os valores de Q_1 e Q_2 .



Problema suplementar 5.

- No problema 9 (da série Problemas e Testes, deste capítulo), suponha que a esfera seja de cobre e que esteja eletrizada positivamente com a carga máxima possível (solicitada naquele problema).
 - Qual o número de elétrons que foi retirado da esfera?
 - Qual o número total de elétrons existentes na esfera, sabendo-se que cada átomo de cobre possui 29 elétrons? Considere os seguintes valores aproximados: $\pi = 3$; densidade do cobre = 9 g/cm^3 ; massa molecular do cobre = 63 g/mol e n° de Avogadro = 6×10^{23} átomos/mol.
 - Qual a porcentagem dos elétrons da esfera que foi retirada no processo de eletrização?



Problema suplementar 7.

- Considere um anel, de raio R (de espessura desprezível), carregado com uma carga elétrica Q , como mostra a figura deste problema.

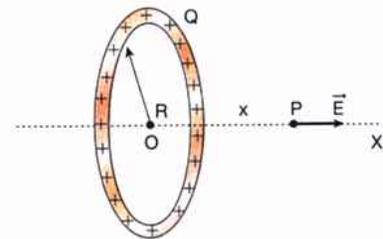
- Supondo que a carga Q esteja distribuída uniformemente no anel, determine o valor do campo elétrico no centro O desse anel.
- Se a carga Q não estivesse distribuída uniformemente (de maneira que parte desta carga estivesse mais concentrada em uma certa região do anel), o campo elétrico em O teria o mesmo valor do que aquele determinado na questão (a)?

- Na figura deste problema, que mostra um anel eletrizado uniformemente com uma carga Q , a reta OX representa um eixo perpendicular ao plano do anel, passando pelo seu centro O . Pode-se mostrar que em um ponto P , deste eixo, situado a uma distância x de O , o valor do campo elétrico criado pela carga Q é dado por

$$E = k_0 \frac{Q \cdot x}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

A direção e o sentido de \vec{E} estão mostrados na figura.

- Usando a equação fornecida, determine o valor de \vec{E} no centro O do anel e verifique se este resultado concorda com a resposta do problema suplementar 7.
- Se você já possuir, de seu curso de Matemática, conhecimentos de cálculo diferencial (máximos e mínimos), determine em que posição do eixo OX o valor do campo elétrico é máximo.



Problema suplementar 8.

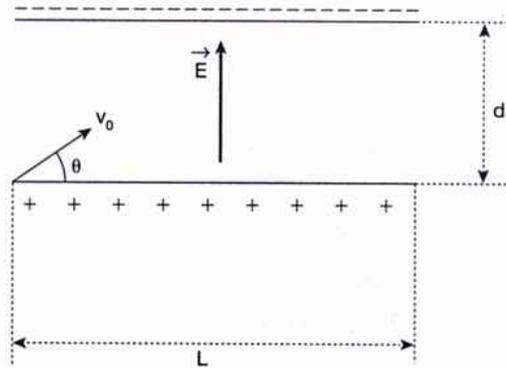
- No problema anterior, considere pontos do eixo OX muito próximos de O , de tal maneira que x seja muito menor do que R . Para esses pontos, o valor de x^2 poderá ser desprezado em comparação com R^2 e, assim, o valor de E será dado por

$$E = k_0 \frac{Qx}{R^3}$$

- Se uma carga q negativa for abandonada, no eixo OX , bem próxima de O , esta carga oscilará em torno deste ponto, supondo-se que a única força que atua sobre ela seja a força devida à carga do anel. Procure entender por que isto ocorre.
- O movimento oscilatório da carga q é harmônico simples? Explique.
- Sendo m a massa da carga q , determine seu período de oscilação.

10. Como informamos no problema 6 (da série Problemas e Testes, deste capítulo), em pontos próximos da superfície da Terra há um campo elétrico de aproximadamente 100 N/C , dirigido verticalmente para baixo. Deseja-se manter em equilíbrio, neste campo, flutuando no ar, uma pequena esfera de massa igual a 40 miligramas.
- Qual o valor da carga elétrica que deveria ser dada a esta esfera? (Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.)
 - Supondo que a esfera fosse maciça, feita de uma liga metálica de densidade igual a 10 g/cm^3 , seria possível mantê-la eletrizada com a carga calculada em (a)? (Lembre que a rigidez dielétrica do ar é $3 \times 10^6 \text{ N/C}$ e tome $\pi = 3$.)
11. Suponha que o pêndulo simples considerado no problema 15 (da série Problemas e Testes, deste capítulo) esteja eletrizado positivamente com uma carga de $4 \times 10^{-7} \text{ C}$. Suponha, ainda, que o campo elétrico mencionado tenha uma intensidade $E = 1,5 \times 10^5 \text{ N/C}$, que a massa do pêndulo seja de 10 g e que seu comprimento seja de $1,0 \text{ m}$. Considerando $g = 10 \text{ m/s}^2$, calcule o período de oscilação do pêndulo.

12. Um elétron é lançado entre duas placas eletrizadas, como mostra a figura. Sejam $v_0 = 6,0 \times 10^6 \text{ m/s}$, $\theta = 45^\circ$, $E = 2,0 \times 10^3 \text{ N/C}$, $d = 3,0 \text{ cm}$ e $L = 12 \text{ cm}$.
- O elétron atingirá a placa negativa?
 - Determinar a posição em que o elétron atinge uma das placas.



Problema suplementar 12.

capítulo 19

Potencial elétrico

Richard R. Hansen/Photo Researchers/Stock Photos

A energia elétrica é transportada pelas torres de transmissão, vistas na foto, sob "alta tensão". O significado desta expressão ficará claro após o estudo deste capítulo.

19.1. Diferença de potencial

O QUE É VOLTAGEM

Suponha um corpo eletrizado criando um campo elétrico no espaço em sua volta. Considere dois pontos, A e B , neste campo elétrico, como mostra a fig. 19-1. Se uma carga de prova positiva q for abandonada em A , sobre ela atuará uma força elétrica \vec{F} devida ao campo. Suponha ainda que, sob a ação desta força, a carga se desloque de A para B .

Como sabemos, neste deslocamento a força elétrica estará realizando um trabalho, que vamos designar por T_{AB} . Em outras palavras, T_{AB} representa uma certa quantidade de energia que a força elétrica \vec{F} transfere para a carga q em seu deslocamento de A para B .

Uma grandeza muito importante no estudo dos fenômenos elétricos está relacionada com este trabalho. Esta grandeza é denominada *diferença de potencial entre os pontos A e B* , sendo representada por $V_A - V_B$ e definida pela seguinte relação:

$$V_A - V_B = \frac{T_{AB}}{q}$$

A diferença de potencial costuma também ser denominada *voltagem ou tensão* entre dois pontos, podendo ainda ser representada por V_{AB} ou simplesmente por V . Assim, quando se diz que a voltagem V_{AB} entre dois pontos é muito grande (alta voltagem), isto significa que o campo elétrico realiza um grande trabalho sobre uma dada carga que se desloca entre estes pontos (a carga recebe, do campo, uma grande quantidade de energia em seu deslocamento).

Observe que, como T_{AB} e q são ambas grandezas escalares, a diferença de potencial V_{AB} é também uma grandeza escalar.

Alessandro Volta (1745-1827)

Físico italiano que recebeu o título de conde, dado por Napoleão, pelos trabalhos que desenvolveu no campo da Eletricidade. Professor na Universidade de Pavia, ele mostrou que os efeitos elétricos observados por Galvani, com pernas de rãs, eram realmente produzidos pelo contato entre dois metais e não devidos a uma espécie de eletricidade animal, como Galvani acreditava. Este estudo levou-o à descoberta da pilha que tomou o nome de *pilha de Volta* e que o levou à celebridade.



Hulton/Getty Images

Da equação de definição $V_{AB} = T_{AB}/q$, vemos que, no S. I., a unidade de medida da voltagem é 1 J/C . Esta unidade é denominada $1 \text{ volt} = 1 \text{ V}$, em homenagem ao físico italiano Alessandro Volta, que viveu no século XVIII. Portanto

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

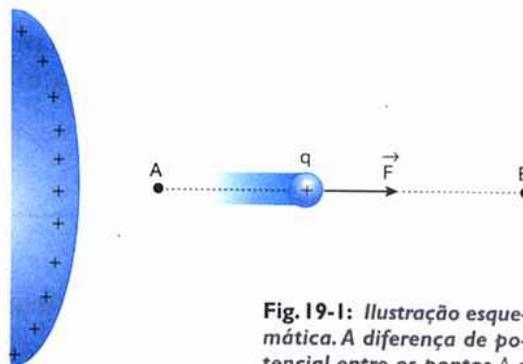


Fig. 19-1: Ilustração esquemática. A diferença de potencial entre os pontos A e B é dada pela expressão $V_A - V_B = T_{AB}/q$.

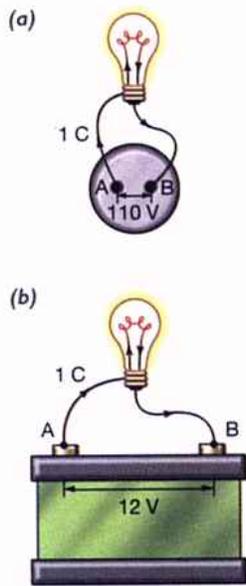


Fig. 19-2: Esquema de uma tomada de 110 V e uma bateria de 12 V.

Em resumo

Quando um campo elétrico realiza um trabalho T_{AB} sobre uma carga de prova positiva q , que se desloca de um ponto A para um ponto B , a diferença de potencial (ou voltagem) V_{AB} entre estes pontos é obtida dividindo-se o trabalho realizado pelo valor da carga que foi deslocada, isto é,

$$V_{AB} = \frac{T_{AB}}{q}$$

COMENTÁRIOS

- 1) O conceito de voltagem está muito relacionado com nossa vida diária. Você já deve ter ouvido falar, por exemplo, que em nossas residências existem tomadas elétricas de 110 V. Como vimos, sendo $110 \text{ V} = 110 \text{ J/C}$, isto significa que, se um aparelho elétrico for ligado nesta tomada (fig. 19-2-a), cada carga de 1 C que se deslocar de um terminal para outro (de A para B) receberá 110 J de energia do campo elétrico existente na tomada (a carga, por sua vez, transfere ao aparelho esta energia que recebeu do campo elétrico). Se a tomada for de 220 V (como as tomadas de algumas cidades), podemos concluir que cada 1 C receberá 220 J de energia ao se deslocar de um terminal para outro nesta tomada. Do mesmo modo, quando dizemos que a bateria de um automóvel apresenta uma voltagem de 12 V, teremos uma energia de 12 J transferida para cada 1 C que se desloca de um pólo para outro desta bateria (fig. 19-2-b).
- 2) Na fig. 19-1, suponha que a carga q se deslocasse de A para B seguindo uma trajetória qualquer, diferente daquela mostrada na figura. Se calculássemos o trabalho que a força elétrica realiza sobre a carga ao longo deste novo caminho, verificaríamos que este trabalho seria o mesmo que o realizado na primeira trajetória. Portanto, o trabalho realizado pela força elétrica, entre dois pontos, é o mesmo qualquer que seja a trajetória seguida pela carga. Como vimos no capítulo 8, quando isto acontece dizemos que a força é *conservativa* (como é o caso do peso de um corpo e da força elástica de uma mola, analisados naquele capítulo). Logo, a força elétrica é um exemplo de força conservativa.
Conseqüentemente, a diferença de potencial entre dois pontos, em um dado campo elétrico, tem um valor único, qualquer que seja a trajetória seguida pela carga de prova usada para calcular esta diferença de potencial.

SENTIDO DO MOVIMENTO DE UMA CARGA

Consideremos dois pontos A e B dentro de um campo elétrico criado por um corpo eletrizado (fig. 19-3). Abandonando uma carga positiva em A , já sabemos que a força elétrica \vec{F} que atua sobre ela estará dirigida para B . Logo, quando esta carga se deslocar de A para B , a força elétrica \vec{F} realizará, sobre ela, um trabalho positivo, isto é, $T_{AB} > 0$. Como $V_A - V_B = T_{AB}/q$, concluímos que a diferença de potencial entre A e B também é positiva, ou seja, $V_A - V_B > 0$. Nestas condições, dizemos que “o potencial de A é maior que o potencial de B ”.

Portanto, podemos observar, na fig. 19-3, que a carga positiva se deslocou, sob a ação da força elétrica, do ponto A , onde o potencial é maior, para o ponto B , onde o potencial é menor. Evidentemente, se abandonássemos uma carga negativa entre os pontos A e B da fig. 19-3, ela iria se deslocar, sob ação da força elétrica (atraída pelo corpo eletrizado), no sentido de B para A . Em outras palavras, a carga negativa tende a se deslocar de pontos onde o potencial é menor para pontos onde ele é maior.

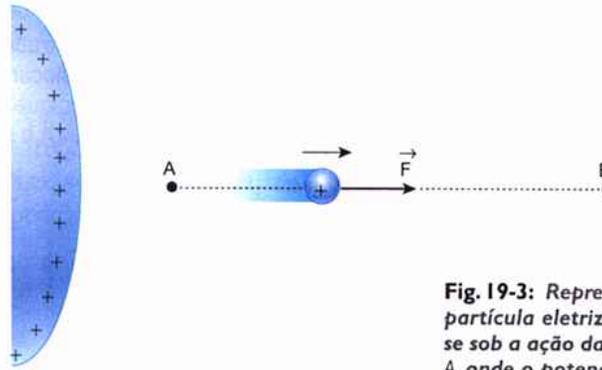


Fig. 19-3: Representação esquemática. Uma partícula eletrizada positivamente desloca-se sob a ação da força elétrica de um ponto, A , onde o potencial é maior para um ponto, B , onde ele é menor.

Assim, podemos destacar:

uma carga positiva abandonada em um campo elétrico tende a se deslocar de pontos onde o potencial é maior para pontos onde ele é menor. Uma carga negativa tenderá a se mover em sentido contrário, isto é, de pontos onde o potencial é menor para pontos onde ele é maior.

Exemplo

- a) Suponha que, na fig. 19-3, uma carga positiva $q = 2,0 \times 10^{-7}$ C se deslocasse de A para B e que o trabalho realizado pela força elétrica, sobre ela, fosse $T_{AB} = 5,0 \times 10^{-3}$ J. Qual é a diferença de potencial V_{AB} entre A e B ?

A diferença de potencial entre A e B é dada por

$$V_{AB} = \frac{T_{AB}}{q} = \frac{5,0 \times 10^{-3}}{2,0 \times 10^{-7}} \quad \text{donde} \quad V_{AB} = 2,5 \times 10^4 \text{ V}$$

Observe que, como T_{AB} foi expresso em joule e q em coulomb, temos V_{AB} expresso em volt (lembre-se de que $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$).

- b) Se uma carga positiva $q = 6,0 \times 10^{-6}$ C for abandonada no ponto A da fig. 19-3, qual será o trabalho que a força elétrica realizará sobre esta carga ao deslocá-la de A para B ?

Da expressão $V_{AB} = \frac{T_{AB}}{q}$, obtemos $T_{AB} = qV_{AB}$

Como já determinamos o valor de V_{AB} , teremos

$$T_{AB} = qV_{AB} = 6,0 \times 10^{-6} \times 2,5 \times 10^4 \quad \text{donde} \quad T_{AB} = 0,15 \text{ J}$$

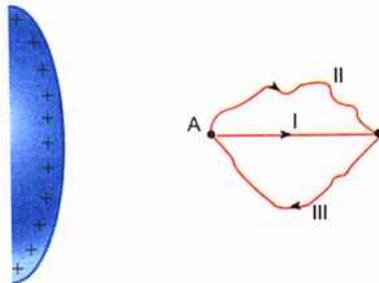
- c) Ainda na fig. 19-3, considere uma carga negativa deslocando-se, sob a ação da força elétrica, de B para A . O trabalho realizado por esta força sobre a carga será positivo ou negativo?

A força elétrica que atua nesta carga negativa está dirigida de B para A e o deslocamento da carga também se efetua neste sentido. Então, como a força e o deslocamento têm o mesmo sentido, o trabalho realizado será positivo.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

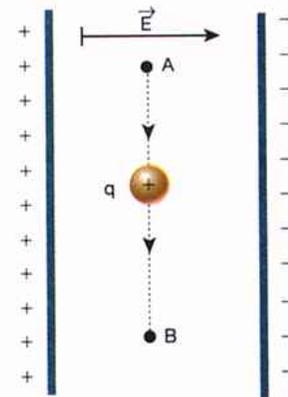
- Lembrando-se dos comentários relacionados com a fig. 19-2, feitos nesta seção, explique o que significa dizer que entre os pólos de uma pilha de lanterna existe uma voltagem de 1,5 V.
- Considere uma lâmpada ligada à tomada elétrica de uma residência. Verifica-se que um trabalho de 44 J é realizado sobre uma carga de 0,20 C que passa, através da lâmpada, de um terminal a outro desta tomada.
 - Qual é a diferença de potencial entre os terminais da tomada?
 - Um aparelho é ligado a esta tomada durante um certo tempo, recebendo 1 100 J de energia das cargas elétricas que passam através dele. Qual é o valor total destas cargas?
- Quando uma carga q se desloca de A para B ao longo da trajetória I mostrada na figura deste exercício, o campo elétrico realiza sobre ela um trabalho de $1,5 \times 10^{-3}$ J. Se esta carga q se deslocasse de A para B ao longo da trajetória II, o trabalho realizado pelo campo elétrico, sobre ela, seria maior, menor ou igual a $1,5 \times 10^{-3}$ J?
 - Se a carga q fosse transportada de B para A, ao longo da trajetória III (veja a figura), qual o trabalho que seria realizado sobre ela pelo campo elétrico?
 - Então, qual é o trabalho que o campo elétrico realiza sobre uma carga que sai de um certo ponto e volta novamente a ele após percorrer uma trajetória qualquer (trajetória fechada)?



Exercício 3.

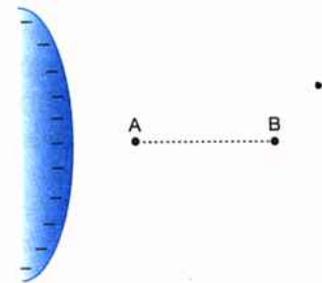
- Uma carga de prova positiva q é transportada por uma pessoa, de A para B, dentro de um campo elétrico uniforme, ao longo da trajetória mostrada na figura deste exercício.
 - Desenhe, em uma cópia da figura, o vetor força elétrica \vec{F} que atua em q enquanto ela se desloca.

- Qual o trabalho T_{AB} que esta força elétrica realiza no deslocamento de A para B?
- Então, qual é a diferença de potencial entre os pontos A e B?



Exercício 4.

- Considere os pontos A e B no campo elétrico criado por um corpo eletrizado negativamente, como mostra a figura deste exercício.
 - Uma carga positiva q é abandonada em um ponto situado entre A e B. Sob a ação da carga criadora do campo, a carga q tende a se deslocar para A ou para B?
 - Então, podemos concluir que o potencial de A é maior ou menor que o de B? Explique.



Exercício 5.

- No exercício anterior, suponha que a carga q , abandonada entre A e B, seja negativa.
 - Sob a ação da carga que cria o campo, a carga q se deslocará para A ou para B?
 - Lembrando-se de sua resposta ao exercício anterior, a carga q está se deslocando para pontos onde o potencial é maior ou menor?
 - Este resultado está de acordo com a afirmação feita no final desta seção?

19.2. Voltagem em um campo uniforme

CÁLCULO DE V_{AB} EM UM CAMPO UNIFORME

A fig. 19-4 mostra duas placas paralelas, separadas por uma distância d e eletrizadas com cargas iguais e de sinais contrários. Como sabemos, entre elas existe um campo uniforme \vec{E} , dirigido da placa positiva A para a placa negativa B .

Para calcularmos a diferença de potencial entre estas duas placas, abandonamos uma carga de prova positiva q junto à placa A e procuramos determinar o trabalho T_{AB} que o campo realiza, sobre esta carga, ao deslocá-la até a placa B . Já vimos que, então, a voltagem procurada será dada por $V_{AB} = T_{AB}/q$.

No caso em questão (campo uniforme), o cálculo de T_{AB} pode ser efetuado facilmente, pois a força elétrica \vec{F} que atua em q (fig. 19-4) permanece constante enquanto esta carga se desloca. De fato, como $\vec{F} = q\vec{E}$ e \vec{E} não varia, concluímos que \vec{F} também será constante. Nestas condições, como a força \vec{F} tem a mesma direção e o mesmo sentido do deslocamento, temos

$$T_{AB} = Fd \quad \text{ou} \quad T_{AB} = qEd$$

Então, a voltagem V_{AB} entre as placas será

$$V_{AB} = \frac{T_{AB}}{q} = \frac{qEd}{q} \quad \text{onde} \quad \boxed{V_{AB} = Ed}$$

Esta expressão nos permite calcular a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer de um campo uniforme. Deve-se observar, entretanto, que a distância d entre os dois pontos deve ser tomada na direção paralela ao vetor \vec{E} . Assim, na fig. 19-5-a, para calcularmos a diferença de potencial entre os pontos M e N , usamos a expressão $V_{MN} = Ed$, onde d é a distância indicada naquela figura.

COMENTÁRIOS

1) A expressão $V_{AB} = Ed$ nos mostra, então, que a voltagem entre dois pontos em um campo uniforme será tanto maior quanto maior for a intensidade deste campo. Além disso, para um dado valor de \vec{E} , vemos que V_{AB} será diretamente proporcional à distância d entre os dois pontos (distância esta medida na direção de \vec{E}). Neste caso, o gráfico $V_{AB} \times d$ será como aquele mostrado na fig. 19-5-b.

2) Da relação $V_{AB} = Ed$, obtemos

$$E = \frac{V_{AB}}{d}$$

Esta expressão é de grande utilidade, pois nos permite obter o valor do campo elétrico através da medida da voltagem V_{AB} . Esta utilidade decorre do fato de ser a voltagem obtida facilmente, no laboratório, por meio de medidas diretas com aparelhos apropriados (voltímetro). Por outro lado, não existem aparelhos que nos permitem medir diretamente a intensidade do campo.

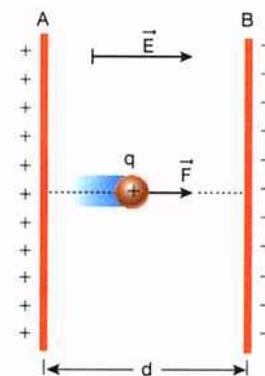


Fig. 19-4: Ilustração esquemática. No campo elétrico uniforme a diferença de potencial é dada por $V_{AB} = Ed$.

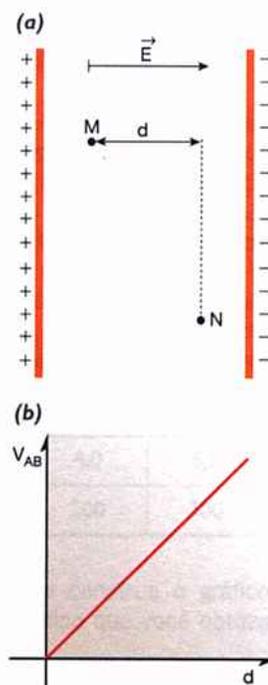


Fig. 19-5: Ilustração esquemática da diferença de potencial entre dois pontos, M e N , de um campo elétrico uniforme (a) e diagrama $V_{AB} \times d$ (b).

- 3) Vimos no capítulo anterior que, no S.I., a unidade de campo elétrico é 1 N/C. Entretanto, pela expressão $E = V_{AB}/d$, vemos que é possível medir o valor de E usando a unidade 1 V/m. É fácil mostrar que estas unidades são equivalentes, isto é, $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$. Assim, quando dizemos que a intensidade de um certo campo elétrico é, por exemplo, $E = 500 \text{ V/m}$, isto equivale a dizer que temos $E = 500 \text{ N/C}$.

Exemplo

Usando um aparelho apropriado, mediu-se a diferença de potencial entre as placas mostradas na fig. 19-4, encontrando-se $V_{AB} = 300 \text{ V}$. Verificou-se, também, que a distância entre A e B era $d = 5,0 \text{ mm}$.

- a) Baseando-se nestas medidas, calcular a intensidade do campo entre as placas.

Vimos que, neste caso, temos $E = V_{AB}/d$. Como

$$V_{AB} = 300 \text{ V} \quad \text{e} \quad d = 5,0 \text{ mm} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

teremos

$$E = \frac{V_{AB}}{d} = \frac{300}{5,0 \times 10^{-3}} \quad \text{donde} \quad E = 6,0 \times 10^4 \text{ V/m}$$

Poderíamos, também, escrever $E = 6,0 \times 10^4 \text{ N/C}$.

- b) Suponha que a carga q mostrada na fig. 19-4 tenha o valor $q = 2,0 \times 10^{-7} \text{ C}$. Qual é o valor da força elétrica \vec{F} que atua nesta carga?

Já sabemos que a força elétrica que atua sobre uma carga q , colocada em um campo elétrico \vec{E} , é dada por

$$F = qE = 2,0 \times 10^{-7} \times 6,0 \times 10^4 \quad \text{donde} \quad F = 1,2 \times 10^{-2} \text{ N}$$

- c) Qual o trabalho T_{AB} que o campo elétrico realiza sobre a carga q ao deslocá-la da placa A para a placa B?

Este trabalho pode ser calculado da seguinte maneira:

$$T_{AB} = Fd = 1,2 \times 10^{-2} \times 5,0 \times 10^{-3} \quad \text{donde} \quad T_{AB} = 6,0 \times 10^{-5} \text{ J}$$

Poderíamos, também, calcular este trabalho partindo da definição de voltagem: $V_{AB} = T_{AB}/q$. Teríamos, então,

$$T_{AB} = qV_{AB} = 2,0 \times 10^{-7} \times 300 \quad \text{donde} \quad T_{AB} = 6,0 \times 10^{-5} \text{ J}$$

Evidentemente, em ambos os casos obtivemos o mesmo valor para T_{AB} .

POTENCIAL EM UM PONTO

Aprendemos, até agora, como calcular a *diferença de potencial* entre dois pontos em um campo elétrico. Entretanto, costuma-se empregar, com frequência, o conceito de *potencial em um ponto*. Mas o potencial em um ponto nada mais é do que a diferença de potencial entre este ponto e um outro, tomado como referência. Então, para calcularmos o potencial em um ponto A, devemos escolher, arbitrariamente, um outro ponto P, denominado *nível de potencial*, ao qual se atribui um potencial nulo ($V_P = 0$). Calculando-se, em seguida, a diferença de potencial entre A e P, obtemos o potencial de A (V_A) em relação a P.

Consideremos, por exemplo, as duas placas da fig. 19-4, entre as quais existe uma diferença de potencial $V_A - V_B = 300 \text{ V}$. Se escolhermos a placa B como nível de potencial, teremos $V_B = 0$ e, então, virá $V_A = 300 \text{ V}$, isto é, o potencial de A é 300 V em relação a B (o potencial de A está 300 V acima do potencial de B). Pode-

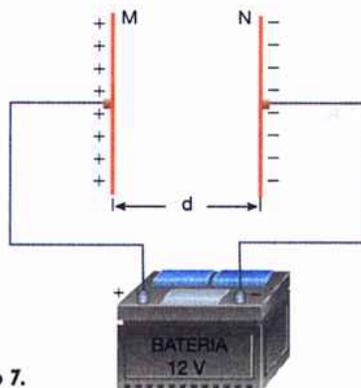
ríamos, contudo, ter escolhido a placa A como referência para cálculo dos potenciais. Neste caso, teríamos $V_A = 0$ (nível) e, então, $V_B = -300$ V, isto é, o potencial de B , em relação à placa A , é -300 V (o potencial de B está 300 V abaixo do nível).

Observe que o potencial em um ponto não tem um valor único. Naturalmente, este valor depende do nível escolhido para referência.

exercícios de fixação

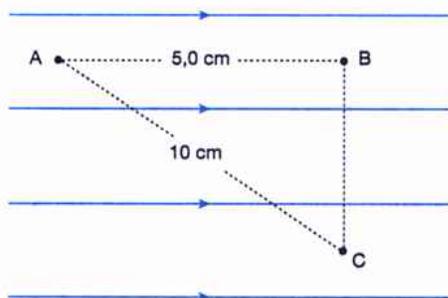
Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

7. Ligando-se os pólos de uma bateria a duas placas metálicas paralelas M e N (veja a figura deste exercício), ficará estabelecida, entre estas placas, uma voltagem $V_{MN} = 12$ V.
- Desenhe, em uma cópia da figura, o vetor \vec{E} que representa o campo entre as placas.
 - Supondo que a distância entre M e N seja $d = 2,0$ mm, calcule a intensidade do campo entre elas.



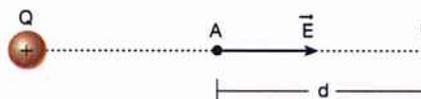
Exercício 7.

8. A figura deste exercício mostra as linhas de força de um campo elétrico uniforme, cuja intensidade vale $E = 1,5 \times 10^4$ N/C. Observe a figura e determine:
- V_{AB}
 - V_{BC}
 - V_{AC}



Exercício 8.

9. Uma carga puntual Q estabelece, no ponto A , o campo elétrico \vec{E} , como mostra a figura deste exercício.
- Sendo d a distância entre A e B , a voltagem entre estes pontos poderia ser calculada por $V_{AB} = Ed$? Explique.
 - A expressão $V_{AB} = T_{AB}/q$ poderia ser usada para calcular esta diferença de potencial?



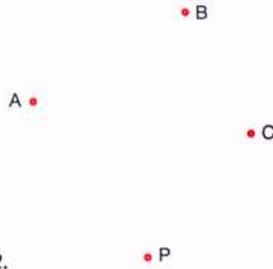
Exercício 9.

10. Verifica-se que, aumentando-se a distância d entre duas placas metálicas eletrizadas (de tal modo que o valor de d permaneça pequeno em relação ao tamanho das placas), o campo elétrico entre elas não se altera. Entretanto, a relação $V_{AB} = Ed$ nos mostra que V_{AB} cresce à medida que d aumenta. Na tabela seguinte são apresentados valores de V_{AB} entre duas placas metálicas, medidos em um laboratório, enquanto a distância d entre as placas era aumentada:

d (mm)	2,0	4,0	6,0
V_{AB} (V)	100	200	300

- Com os dados da tabela construa o gráfico $V_{AB} \times d$. O aspecto do gráfico que você obteve era o esperado?
 - Qual a grandeza representada pela inclinação deste gráfico?
11. a) Calcule, em V/mm, a inclinação do gráfico obtido no exercício anterior.
- b) Expresse, em V/m e em N/C, a intensidade do campo entre as placas.

12. Os pontos A , B , C e P mostrados na figura deste exercício encontram-se em uma região onde existe um campo elétrico. Considerando o nível de potencial em P , sabe-se que os potenciais dos demais pontos são $V_A = 120$ V, $V_B = 150$ V e $V_C = 80$ V.



Exercício 12.

- a) Determine os valores das diferenças de potencial $V_A - V_C$ e $V_B - V_C$.

- b) Considerando, agora, que o nível de potencial passe a ser o ponto C , diga quais serão os valores V_C , V_A e V_B em relação a este novo nível.
c) Ainda com o nível em C , diga qual é o potencial, V_P , do ponto P .

13. Considerando os pontos e os dados do exercício anterior, calcule a diferença de potencial $V_B - V_A$ supondo que

- a) O nível de potencial esteja em P .
b) O nível de potencial esteja em C .

14. Observando os resultados dos exercícios 12 e 13, responda:

- a) O valor do potencial em um ponto depende do nível escolhido para referência?
b) O valor da diferença de potencial entre dois pontos depende do nível de potencial escolhido?

19.3. Voltagem no campo de uma carga puntual

VALOR DO POTENCIAL CRIADO POR UMA CARGA PUNTUAL

Na seção anterior aprendemos a calcular a diferença de potencial em um campo uniforme. Suponhamos, agora, que desejássemos calcular a voltagem V_{AB} entre dois pontos A e B do campo criado por uma carga puntual Q (fig. 19-6). Isto poderia ser feito usando-se a expressão $V_{AB} = T_{AB}/q$ que, como sabemos, é a equação que define a diferença de potencial entre dois pontos, sendo válida, portanto, em qualquer situação.

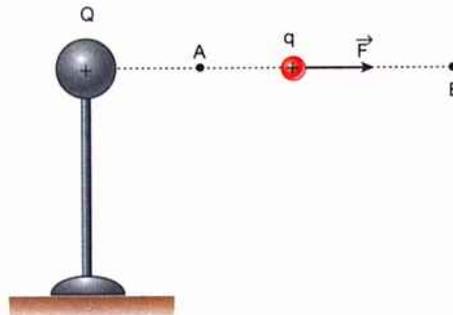


Fig. 19-6: Esquema do valor da força \vec{F} que atua na carga q que varia ao longo de AB .

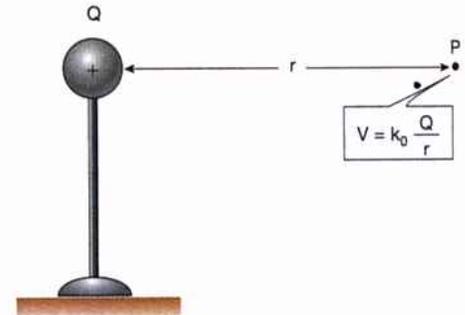


Fig. 19-7: Ilustração esquemática. O potencial criado pela carga Q , no ponto P , é dado por $V = k_0 Q/r$.

Entretanto, ao tentarmos calcular o trabalho T_{AB} realizado pela força elétrica sobre a carga de prova, encontraremos uma dificuldade: esta força elétrica *varia* enquanto a carga de prova se desloca de A para B , pois o campo criado pela carga puntual Q *não* é um campo uniforme. Nestas condições (\vec{F} não é constante), o cálculo do trabalho T_{AB} só pode ser feito usando-se métodos matemáticos que apenas serão estudados em cursos mais avançados.

Fazendo uso de tais métodos, podemos mostrar que uma carga puntual Q , no ar, estabelece em um ponto P , situado a uma distância r desta carga, um potencial V dado por (fig. 19-7):

$$V = k_0 \frac{Q}{r}$$

Esta expressão para o valor do potencial foi obtida considerando-se como referência um ponto muito afastado da carga Q ou, como costumamos dizer, esta expressão fornece o valor do potencial em relação a um nível no infinito.

COMENTÁRIOS

- 1) Ao usarmos a expressão $V = k_0 Q/r$, é importante observar que o sinal da carga Q deve ser levado em consideração. Assim, quando Q é positiva, o potencial em P será também positivo e, se Q for uma carga negativa, o valor de V em P será negativo.
- 2) Como já sabemos calcular o potencial em um ponto do campo criado por uma carga puntual, podemos facilmente calcular a voltagem entre dois pontos quaisquer deste campo. Por exemplo: voltando à fig. 19-6, obtemos o potencial V_A em A e o potencial V_B em B (ambos usando a relação $V = k_0 Q/r$) e a diferença entre estes valores nos fornecerá a voltagem V_{AB} , isto é, $V_{AB} = V_A - V_B$.

Exemplo

Suponha que, na fig. 19-6, o valor da carga Q seja $Q = 2,0 \mu\text{C}$. Suponha, ainda, que as distâncias da carga Q aos pontos A e B sejam $r_A = 20 \text{ cm}$ e $r_B = 60 \text{ cm}$. Calcular a diferença de potencial V_{AB} .

Como vimos, devemos inicialmente calcular, usando a expressão $V = k_0 Q/r$, os potenciais V_A e V_B dos pontos A e B . Trabalhando com unidades do S.I., temos $Q = 2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $r_A = 0,20 \text{ m}$ e $r_B = 0,60 \text{ m}$. Então:

$$V_A = k_0 \frac{Q}{r_A} = 9,0 \times 10^9 \times \frac{2,0 \times 10^{-6}}{0,20} \quad \text{donde} \quad V_A = 9,0 \times 10^4 \text{ V}$$

$$V_B = k_0 \frac{Q}{r_B} = 9,0 \times 10^9 \times \frac{2,0 \times 10^{-6}}{0,60} \quad \text{donde} \quad V_B = 3,0 \times 10^4 \text{ V}$$

Portanto, a diferença de potencial entre A e B será:

$$V_{AB} = V_A - V_B = 9,0 \times 10^4 - 3,0 \times 10^4 \quad \text{donde} \quad V_{AB} = 6,0 \times 10^4 \text{ V}$$

POTENCIAL ESTABELECIDO POR VÁRIAS CARGAS PUNTUAIS

Na fig. 19-8 temos várias cargas puntuais Q_1 , Q_2 e Q_3 e desejamos calcular o potencial que elas estabelecem no ponto P . Para isto, calculamos inicialmente o potencial V_1 que a carga Q_1 estabelece em P , usando a expressão já conhecida: $V_1 = k_0 Q_1/r_1$. De modo análogo, calculamos os potenciais V_2 e V_3 que cada uma das cargas Q_2 e Q_3 estabelecem em P . Somando *algebricamente* estes valores de V_1 , V_2 e V_3 obtemos o potencial V , estabelecido no ponto P , pelo conjunto das três cargas.

Observe que devemos realizar uma soma algébrica porque o potencial é uma *grandeza escalar*. Como vimos no capítulo anterior, se desejássemos calcular

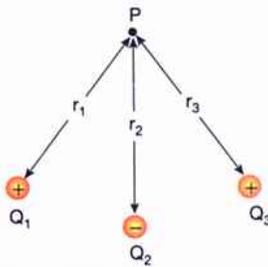


Fig. 19-8: O potencial no ponto P , estabelecido simultaneamente pelas cargas Q_1 , Q_2 e Q_3 , é igual à soma algébrica dos potenciais que cada carga produz naquele ponto. Ilustração esquemática.

o campo elétrico \vec{E} no ponto P da fig. 19-8, deveríamos efetuar uma *soma vetorial* que é, sem dúvida, uma operação mais trabalhosa do que a soma algébrica. Vamos, então, que, quando estamos lidando com várias cargas, a determinação do potencial em um ponto é feita muito mais facilmente do que a determinação do campo elétrico.

POTENCIAL DE UMA ESFERA ELETRIZADA

Vimos no capítulo anterior que, para o cálculo do campo elétrico criado por uma esfera uniformemente eletrizada, em pontos exteriores a ela, tudo se passa como se a carga da esfera estivesse concentrada em seu centro. Por este motivo, quando vamos calcular o potencial estabelecido por uma esfera eletrizada, em um ponto exterior a ela, podemos também usar a expressão que já conhecemos e que nos fornece o potencial criado por uma carga puntual. Assim, na fig. 19-9, podemos afirmar que a carga Q , distribuída na esfera, estabelece no ponto P um potencial (em relação a um nível no infinito) dado por

$$V = k_0 \frac{Q}{r}$$

onde r é a distância de P ao centro da esfera.

Se o ponto estiver situado bastante próximo da superfície da esfera, como o ponto C mostrado na fig. 19-9, é claro que teremos $r = R$, sendo R o raio da esfera.

Desta maneira, o potencial de qualquer ponto da superfície desta esfera será dado pela expressão

$$V = k_0 \frac{Q}{R}$$

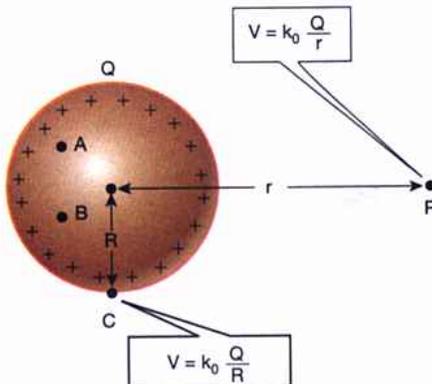


Fig. 19-9: O potencial estabelecido pela esfera eletrizada com carga Q , no ponto P , externo à esfera, é dado por $V = k_0 Q/r$. Ilustração esquemática.

Vejam agora o que se passa com o potencial de pontos interiores à esfera. Supondo que a esfera seja metálica (em equilíbrio eletrostático), sabemos que o campo elétrico é nulo em seu interior.

Então, se imaginarmos uma carga de prova sendo deslocada de A para B na fig. 19-9, é claro que o trabalho T_{AB} , realizado pelo campo elétrico sobre ela, será nulo (pois não há força elétrica atuando na carga). Portanto, como $T_{AB} = 0$, virá

$$V_A - V_B = \frac{T_{AB}}{q} \quad \text{donde} \quad V_A - V_B = 0 \quad \text{ou} \quad V_A = V_B$$

isto é, os pontos situados no interior de uma esfera metálica eletrizada estão todos no mesmo potencial.

Evidentemente, se uma carga de prova fosse deslocada de A para C (fig. 19-9), não haveria, pelo mesmo motivo, realização de trabalho, ou seja, $T_{AC} = 0$ e, então, $V_A = V_C$. Podemos assim concluir que *todos* os pontos da esfera, quer estejam em seu interior, quer estejam em sua superfície, estão em um mesmo potencial. Portanto, como a expressão

$$V = k_0 \frac{Q}{R}$$

nos fornece o potencial em um ponto da superfície, é claro que poderemos usá-la para calcular o potencial em *qualquer* ponto da esfera.

Exemplo

Considere uma esfera metálica, de raio R , eletrizada com uma carga positiva Q . Sendo V o potencial estabelecido pela carga da esfera e r a distância de um ponto qualquer ao seu centro, faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $V \times r$ para pontos do interior e do exterior da esfera (de $r = 0$ até $r \rightarrow \infty$).

Sabemos que todos os pontos do interior e da superfície da esfera têm o mesmo potencial, que é dado por $V = k_0 Q/R$. Portanto, quando r varia de $r = 0$ até $r = R$, o potencial V permanece constante, como está mostrado no gráfico da fig. 19-10. Para pontos exteriores à esfera ($r > R$), o potencial é dado por $V = k_0 Q/r$, isto é, V é inversamente proporcional a r (enquanto r cresce, V diminui na mesma proporção). Então, para $r > R$, o gráfico $V \times r$ será uma curva com o aspecto mostrado na fig. 19-10 (esta curva, como sabemos, é denominada hipérbole).

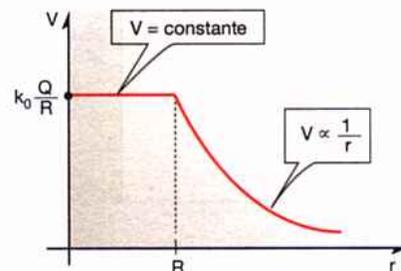
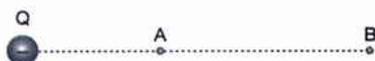


Fig. 19-10: Gráfico para o exemplo da secção 19.3.

os de fixação exercícios de fixação exercícios de fixação

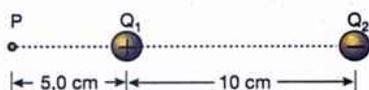
Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

15. Considere um ponto situado a uma distância r de uma carga puntual positiva Q . Sendo V o valor do potencial estabelecido por Q neste ponto, responda:
 - a) Duplicando-se r , quantas vezes menor torna-se o potencial V ?
 - b) E se o valor de r for triplicado?
 - c) Então, faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $V \times r$. Como se denomina esta curva?
16. A carga puntual Q , mostrada na figura deste exercício, vale $Q = 3,0 \mu\text{C}$, e as distâncias dos pontos A e B a esta carga são $r_A = 15 \text{ cm}$ e $r_B = 45 \text{ cm}$. Suponha a carga no ar e determine:
 - a) O potencial em A.
 - b) O potencial em B.
 - c) A diferença de potencial V_{BA} .



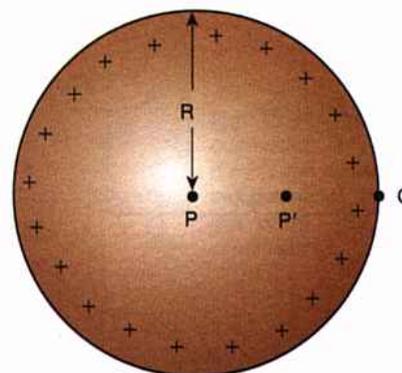
Exercício 16.

17. Considere as cargas puntuais Q_1 e Q_2 , tendo ambas módulo igual a $5,0 \mu\text{C}$, porém de sinais contrários (veja a figura deste exercício).
 - a) Qual o potencial V_1 que Q_1 estabelece em P ?
 - b) Qual o potencial V_2 que Q_2 estabelece em P ?
 - c) Então, qual o valor do potencial V no ponto P ?



Exercício 17.

18. A figura deste exercício representa uma esfera metálica eletrizada, em equilíbrio eletrostático. Considerando os pontos P e P' mostrados na figura, responda:
 - a) Qual o valor da intensidade do campo elétrico em P ?
 - b) O potencial em P é nulo ou diferente de zero?
 - c) E a diferença de potencial entre P e P' é nula ou diferente de zero?



Exercício 18.

19. Suponha que o valor da carga na esfera do exercício anterior seja $Q = 1,5 \mu\text{C}$ e que o seu raio seja $R = 30 \text{ cm}$. Considerando a esfera no ar:
 - a) Calcule o potencial do ponto C, situado na superfície da esfera.
 - b) Então, qual é o potencial do ponto P ? E do ponto P' ?

Energia potencial elétrica

Como vimos, a diferença de potencial entre dois pontos em um campo elétrico é dada por

$$V_A - V_B = \frac{T_{AB}}{q}$$

Então, o trabalho que o campo realiza sobre a carga q , deslocando-se de A para B , como na fig. I, é

$$T_{AB} = qV_A - qV_B$$

Anteriormente, já chamamos sua atenção para o fato de que este trabalho não depende do caminho que a carga irá percorrer de A para B , isto é, o campo elétrico é um campo conservativo. Sabemos, entretanto, que quando uma força é conservativa, existe sempre associada a ela uma *energia potencial* E_p , que se relaciona com o trabalho da força conservativa da seguinte maneira:

$$T_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$$

Como você provavelmente se lembra, vimos, no capítulo 8, que esta relação é verdadeira para a força gravitacional, para a força elástica e para qualquer força conservativa. Como a energia potencial em cada ponto tem um valor bem definido, identificando as expressões

$$T_{AB} = qV_A - qV_B \quad \text{e} \quad T_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$$

teremos

$$E_{pA} = qV_A \quad \text{e} \quad E_{pB} = qV_B$$

Assim, de um modo geral, podemos dizer que:

se uma carga q é colocada em um ponto onde o potencial elétrico é V , ela possui nesta posição uma energia potencial elétrica

$$E_p = qV$$

Para tornar estas idéias mais claras, analisaremos a situação representada na fig. II. Consideremos uma carga puntual Q , estabelecendo um campo elétrico, no qual é colocada uma carga, também puntual, q , a uma distância r de Q (veja a fig. II). Sabemos que o potencial estabelecido por Q à distância r é $V = k_0 Q/r$. Portanto, a energia potencial de q , naquele ponto, é dada por

$$E_p = q \cdot V \quad \text{donde} \quad E_p = k_0 \frac{qQ}{r}$$

Esta é, então, a expressão que fornece a energia potencial elétrica (em relação ao infinito) de uma carga puntual q , no campo criado por uma carga puntual Q , a uma distância r desta carga.

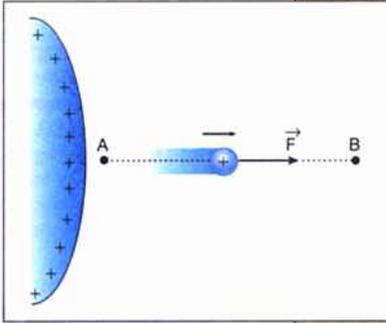


Figura I.

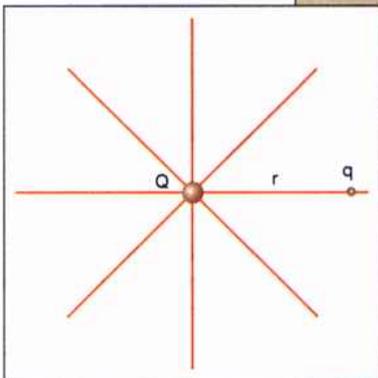


Figura II.

Ao usar esta equação, os sinais de Q e q precisam ser levados em consideração. Por exemplo, supondo $Q = +5,0 \mu\text{C}$, $q = +2,0 \mu\text{C}$ e $r = 10 \text{ cm}$, temos:

$$E_p = k_0 \frac{qQ}{r} = 9 \times 10^9 \times \frac{5,0 \times 10^{-6} \times 2,0 \times 10^{-6}}{0,10}$$

$$\text{donde } E_p = 0,9 \text{ J}$$

Este resultado significa que a carga q possui uma E_p de 0,9 J acima do valor em pontos muito distantes (infinito, onde $E_p = 0$). Portanto, se q for abandonada daquela posição e Q for mantida fixa, a carga q será repelida e alcançará um ponto no infinito com energia cinética $E_c = 0,9 \text{ J}$ (supondo desprezíveis outras forças que atuam em q).

Se o sinal da carga q for negativo, teremos, evidentemente, $E_p = -0,9 \text{ J}$. Então, a energia desta carga é menor do que a que ela teria no infinito (onde $E_p = 0$). Esta carga, sendo atraída por Q , só pode ser transportada para um ponto muito afastado se uma força externa realizar sobre ela um trabalho no mínimo igual a 0,9 J (neste caso, ela alcançaria o infinito com $E_c = 0$).

19.4. superfícies eqüipotenciais

O QUE É UMA SUPERFÍCIE EQÜIPOTENCIAL

Consideremos uma carga puntual Q e um ponto P situado a uma distância r desta carga (fig. 19-11). Sabemos que o potencial em P é dado por

$$V = k_0 \frac{Q}{r}$$

Então, quaisquer outros pontos, como P' , P'' etc., situados à mesma distância r da carga Q , terão o mesmo potencial de P . É claro que estes pontos estão situados sobre uma superfície esférica de raio r e com seu centro em Q . Uma superfície como esta, cujos pontos possuem todos o mesmo potencial, é denominada *superfície eqüipotencial* (fig. 19-11).

Qualquer outra superfície esférica com centro em Q será, também, uma superfície eqüipotencial, pois todos os seus pontos estão igualmente distanciados de Q .

Assim, na fig. 19-12, as superfícies esféricas S_1 , S_2 , S_3 etc. são eqüipotenciais. Observe que, embora todos os pontos de S_2 , por exemplo, tenham o mesmo potencial, este valor é, porém, diferente do potencial dos pontos de S_1 ou de S_3 .

Na fig. 19-12 estão representadas, também, algumas linhas de força do campo criado pela carga Q . Como sabemos,

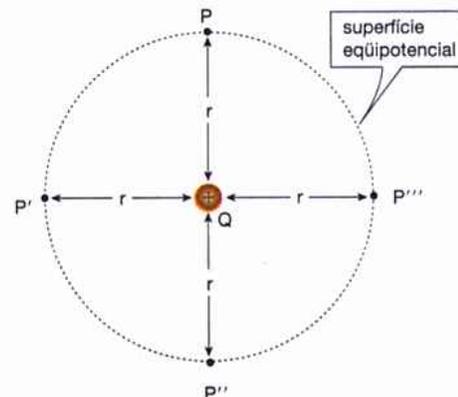


Fig. 19-11: Ilustração esquemática. Os pontos P , P' , P'' e P''' , que possuem o mesmo potencial, estão situados sobre uma esfera de centro em Q .

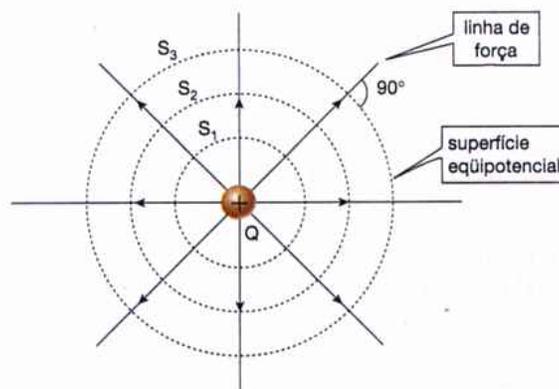


Fig. 19-12: Esquema de superfícies eqüipotenciais do campo criado pela carga Q .

essas linhas são radiais e, portanto, são perpendiculares às superfícies equipotenciais. Pode-se mostrar que esta propriedade é válida não apenas para o campo criado por uma carga puntual, isto é, ela é uma propriedade geral: para qualquer campo elétrico, as linhas de força são sempre perpendiculares às superfícies equipotenciais.

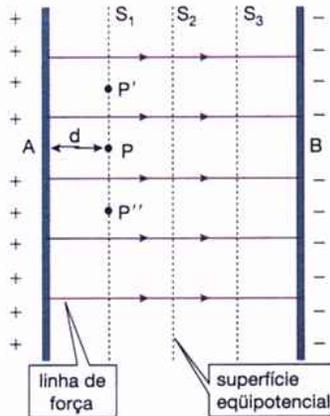


Fig. 19-13: Ilustração esquemática. As superfícies equipotenciais (S_1 , S_2 , S_3) são perpendiculares às linhas de força do campo elétrico.

SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS EM UM CAMPO UNIFORME

Na fig. 19-13 consideremos um ponto P , em um campo elétrico uniforme criado pelas placas A e B . Como sabemos, a diferença de potencial entre a placa A e o ponto P é dada por

$$V_A - V_P = Ed$$

Vemos, então, que o potencial do ponto P , em relação à placa A , depende apenas de sua distância d à placa (lembre-se de que a intensidade do campo é constante). Assim, os pontos P , P' , P'' etc., situados à mesma distância da placa A , possuem o mesmo potencial. É claro, pois, que uma superfície plana, paralela às placas, como a superfície S_1 mostrada na fig. 19-13, será uma superfície equipotencial. Da mesma forma, S_2 (ou S_3) também será uma superfície equipotencial, cujo potencial, entretanto, é diferente do potencial de S_1 .

Algumas linhas de força do campo uniforme, criado pelas placas, estão representadas na fig. 19-13. Observe que estas linhas são perpendiculares às superfícies equipotenciais, em concordância com o que afirmamos anteriormente.

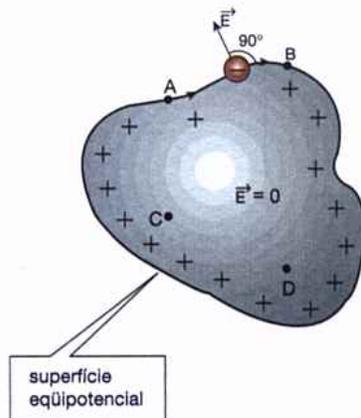


Fig. 19-14: Ilustração esquemática. Todos os pontos de um condutor em equilíbrio eletrostático têm o mesmo potencial.

TODOS OS PONTOS DE UM CONDUTOR EM EQUILÍBRIO ELETROSTÁTICO TÊM O MESMO POTENCIAL

Já aprendemos que, em pontos próximos à superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático, o vetor campo elétrico é perpendicular a esta superfície. A fig. 19-14 representa um condutor nesta situação. Imaginemos uma carga de prova q sendo transportada, ao longo da superfície deste condutor, do ponto A para o ponto B . Neste movimento, a força elétrica que atua em q será sempre perpendicular ao seu deslocamento. Por este motivo, o trabalho realizado sobre q , pela força elétrica, será nulo, isto é, $T_{AB} = 0$. Então, como

$$V_A - V_B = \frac{T_{AB}}{q} \quad \text{vem} \quad V_A - V_B = 0 \quad \text{ou} \quad V_A = V_B$$

Logo, todos os pontos da superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático têm o mesmo potencial, isto é, esta superfície é equipotencial.

Lembrando-se de que o campo elétrico é nulo no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático, podemos concluir, como fizemos ao estudar o potencial de uma esfera, que os pontos C e D da fig. 19-14 estão no mesmo potencial, isto é, $V_C = V_D$. Do mesmo modo, é fácil mostrar que $V_A = V_C$, ou seja, todos os pontos de um condutor em equilíbrio eletrostático, quer sejam de sua superfície, quer sejam de seu interior, estão no mesmo potencial. Já havíamos mostrado que

este resultado era válido para um condutor esférico e, agora, acabamos de ver que ele é verdadeiro qualquer que seja a forma do condutor.

DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS ENTRE DOIS CONDUTORES

Suponha que dois corpos metálicos, 1 e 2, estejam eletrizados com cargas Q_1 e Q_2 (fig. 19-15). Seja V_1 o potencial do condutor 1, isto é, todos os pontos deste corpo possuem o mesmo potencial, cujo valor é V_1 . De maneira análoga, seja V_2 o potencial do condutor 2.

Estabelecendo-se o contato elétrico entre estes condutores, como mostra a fig. 19-15, vamos analisar o que ocorrerá com o potencial e a carga de cada um deles. Lembrando-se de que as cargas elétricas tendem a se mover de um ponto para outro quando existe uma diferença de potencial entre eles, concluímos que se $V_1 \neq V_2$ haverá passagem de cargas elétricas de um condutor para o outro. Sabemos que são os elétrons livres que podem se deslocar em um condutor metálico e que as cargas negativas tendem a se deslocar de pontos onde o potencial é menor para aqueles que possuem potencial maior. Portanto, ao serem ligados os dois corpos por meio de um condutor (fig. 19-15), os elétrons se deslocarão do corpo de menor potencial para o de maior potencial.

Em virtude desta transferência de elétrons, as cargas Q_1 e Q_2 e os potenciais V_1 e V_2 se alterarão e haverá um instante em que os potenciais dos dois condutores se tornarão iguais, isto é, teremos $V_1 = V_2$. É claro que, a partir deste instante, não haverá mais passagem de cargas de um condutor para o outro e eles terão atingido uma situação final de equilíbrio.

Exemplo

Uma esfera condutora 1, de raio R_1 e eletrizada positivamente, é ligada a uma outra esfera 2, também condutora, de raio R_2 e descarregada.

a) Descrever o processo de transferência de cargas de uma esfera para a outra.

A esfera 1, estando eletrizada positivamente, possui um potencial V_1 superior ao da esfera 2, que está inicialmente descarregada (potencial inicial $V_2 = 0$). Haverá, então, passagem de elétrons de 2 (potencial menor) para 1 (potencial maior) como mostra a fig. 19-16-a. A esfera 2 adquire, assim, uma carga positiva e a esfera 1, recebendo elétrons, terá reduzido o valor de sua carga positiva. O fluxo de elétrons cessará quando as esferas atingirem o mesmo potencial, isto é, quando $V_1 = V_2$ (fig. 19-16-b).

b) Qual será a relação entre as cargas Q_1 e Q_2 nas esferas quando for atingida a situação final de equilíbrio?

Na situação de equilíbrio sabemos que $V_1 = V_2$. Lembrando-se de que o potencial de uma esfera é dado por $V = k_0 Q/R$ teremos, nesta situação:

$$k_0 \frac{Q_1}{R_1} = k_0 \frac{Q_2}{R_2} \quad \text{donde} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Isto é, na situação final, a carga em cada esfera será proporcional ao seu raio (a esfera de maior raio fica eletrizada com carga maior).

c) Quando um condutor eletrizado é ligado à Terra, verificamos que ele se descarrega. Explique este fato, tendo em vista a resposta da questão anterior.

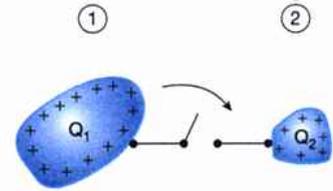


Fig. 19-15: Quando é estabelecido o contato elétrico entre dois condutores, há passagem de carga elétrica de um para o outro até que seus potenciais se igualem.

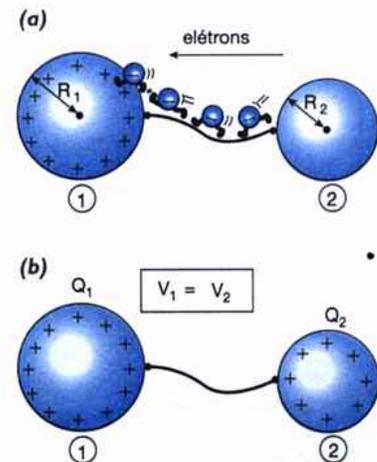


Fig. 19-16: Esquema para o exemplo da seção 19.4.

Esta ligação equivale àquela mostrada na fig. 19-16, supondo que a esfera 2 seja a Terra. Neste caso, o raio R_2 (raio da Terra) será muitas vezes maior do que R_1 (dimensões de um condutor de tamanho normal).

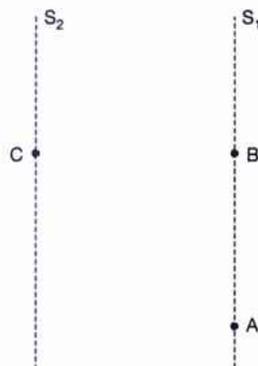
Então, para que a relação $Q_1/Q_2 = R_1/R_2$ seja verdadeira, devemos ter Q_2 muitas vezes maior do que Q_1 , ou seja, Q_1 é desprezível em relação a Q_2 . Isto equivale a dizer que praticamente toda a carga do corpo eletrizado se transferiu para a Terra.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

20. Na figura deste exercício, S_1 e S_2 representam duas superfícies eqüipotenciais em uma região onde existe um campo elétrico uniforme. Sabe-se que o potencial de S_1 é $V_1 = 500$ V e o de S_2 é $V_2 = 300$ V (ambos em relação a um mesmo nível).

- Abandonando-se uma carga de prova positiva em um ponto situado entre S_1 e S_2 , qual o sentido de movimento desta carga?
- Desenhe, então, em uma cópia da figura, algumas linhas de força do campo elétrico existente na região (não se esqueça de indicar o sentido destas linhas).
- Qual é a diferença de potencial entre os pontos A e B? E entre A e C?

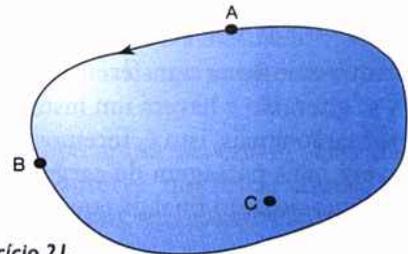


Exercício 20.

21. Considere um bloco metálico, eletrizado positivamente, em equilíbrio eletrostático. Os pontos A e B estão situados na superfície deste bloco e C é um ponto de seu interior (veja a figura deste exercício). Sabendo-se que o potencial de A, em relação a um certo nível, vale $V_A = 800$ V, responda:

- Qual é o potencial do ponto B (em relação ao mesmo nível)?
- E o potencial do ponto C (considere ainda o mesmo nível)?

- Se uma carga de prova for transportada de A para B, qual será o trabalho T_{AB} realizado pelo campo elétrico sobre ela?



Exercício 21.

- No exemplo resolvido no final desta secção, suponha que a carga inicial na esfera 1 fosse $Q = 6,0 \mu\text{C}$ e que $R_1 = R_2$. Qual seria, neste caso, a carga final em cada esfera?
- Suponha duas esferas metálicas, 1 e 2, de raios $R_1 = 20$ cm e $R_2 = 30$ cm, eletrizadas ambas positivamente com cargas $Q_1 = 1,8 \mu\text{C}$ e $Q_2 = 1,2 \mu\text{C}$, situadas no ar.
 - Calcule os potenciais V_1 e V_2 de cada esfera.
 - Ligando-se as duas esferas por meio de um fio condutor, em que sentido se dará o fluxo de elétrons que passa de uma esfera para outra?
- Considere as esferas do exercício anterior. Após ser estabelecida a ligação entre elas, responda:
 - O valor da carga na esfera 1 aumenta ou diminui? E o valor da carga na esfera 2?
 - O valor do potencial da esfera 1 aumenta ou diminui? E o valor do potencial da esfera 2?
- Considerando ainda as esferas do exercício 23, ao ser atingida a situação final de equilíbrio, isto é, após cessar o fluxo de elétrons:
 - O valor do potencial da esfera 1 será maior, menor ou igual ao valor do potencial da esfera 2?
 - Sendo Q'_1 e Q'_2 as cargas finais em cada esfera, qual é o valor de $Q'_1 + Q'_2$?

um tópico especial para você aprender um pouco mais

19.5. O gerador de Van de Graaff

ALTAS VOLTAGENS NECESSÁRIAS NA FÍSICA MODERNA

Em alguns trabalhos de pesquisa no campo da Física Moderna torna-se necessária a utilização de voltagens muito elevadas, cujos valores chegam a atingir alguns milhões de volts. As altas voltagens são usadas para acelerar partículas atômicas eletrizadas (prótons, elétrons, íons etc.), fazendo com que elas adquiram grandes velocidades. Estas partículas são, então, lançadas contra os núcleos atômicos de diversos elementos, provocando reações nucleares que são estudadas pelos físicos. Um dispositivo que permite obter voltagens muito elevadas para serem usadas nas experiências mencionadas é o *gerador de Van de Graaff*. O nome deste aparelho é uma homenagem ao físico americano Robert van de Graaff, que idealizou e construiu o primeiro gerador deste tipo em 1930.

Robert J. van de Graaff (1901-1967)

Engenheiro americano que após estudar alguns anos em Paris, onde teve a oportunidade de assistir a conferências de Marie Curie, passou a se dedicar à pesquisa no campo da Física Atômica. Trabalhando na Universidade de Oxford, Van de Graaff sentiu a necessidade, para desenvolver suas pesquisas, de uma fonte de partículas subatômicas de alta energia. Criou então o gerador de Van de Graaff, acelerador de partículas que recebeu seu próprio nome e que encontrou larga aplicação, não só na Física Atômica, como também na Medicina e na indústria. Mais tarde, voltando aos Estados Unidos, depois de se dedicar à pesquisa durante um certo tempo, montou uma indústria para fabricar exemplares de seu gerador.



ADS

A seguir, apresentaremos os princípios físicos nos quais se baseia o gerador de Van de Graaff, faremos uma descrição do aparelho e mostraremos como ele funciona.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE VAN DE GRAAFF

Vimos, neste capítulo, que se um corpo metálico C , eletrizado, for colocado em contato com outro corpo, D , também metálico, inicialmente descarregado, haverá transferência de apenas parte da carga de C para D (veja a fig. 19-17). A transferência de carga é parcial porque ela será interrompida quando os potenciais dos dois corpos se igualarem.

Suponha, agora, que o corpo D possua uma cavidade e que C fosse introduzido nela (fig. 19-18). Nestas condições, a carga de C induziria cargas elétricas nas superfícies interna e externa de D . No caso da fig. 19-18, a superfície interna fica eletrizada negativamente e a superfície externa, positivamente. Verifica-se que a carga induzida nas paredes tem o mesmo módulo da carga no corpo C (que provocou a indução). Então, se este corpo for colocado em conta-

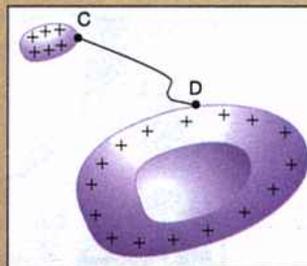


Fig. 19-17: Quando o corpo metálico C eletrizado, externo a D , é colocado em contato com o condutor D (descarregado), apenas parte da carga de C passa para D . Ilustração esquemática.

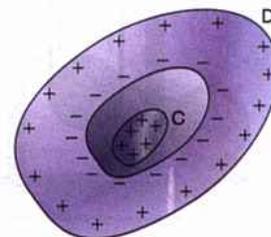


Fig. 19-18: Um condutor eletrizado C , no interior do condutor descarregado D , faz aparecer cargas induzidas nas superfícies interna e externa de D . Ilustração esquemática.

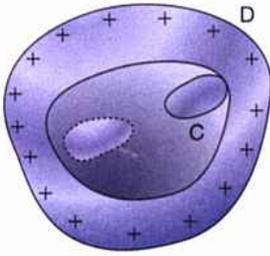


Fig. 19-19: Ilustração esquemática. Quando o corpo metálico *C* eletrizado, no interior de *D*, é posto em contato com *D*, toda a carga de *C* passa para *D*.

to com a parede interna de *D* (fig. 19-19), a carga induzida nesta parede será neutralizada pela carga de *C*. Podemos ver, pela fig. 19-19, que como conseqüência disto o corpo *D* ficará eletrizado com uma carga de mesmo sinal e de mesmo módulo que a carga inicial do corpo *C*. Em outras palavras, tudo se passa como se a carga de *C* fosse *integralmente* transferida para *D*.

Portanto, quando um corpo metálico eletrizado é colocado em contato interno com outro, da maneira mostrada na fig. 19-19, toda sua carga é transferida para este outro. Lembre-se de que isto não acontece quando o contato é feito externamente (fig. 19-17).

Quando há contato interno, a transferência de carga do corpo que está dentro da cavidade para o corpo externo é integral, mesmo que este já possua uma carga inicial. Assim, na fig. 19-19, se o corpo *C* for novamente eletrizado e outra vez ligado internamente ao corpo *D*, sua carga se transferirá totalmente para *D*. Esta operação pode ser repetida várias vezes e, assim, é possível acumular em *D* uma quantidade de carga cada vez maior. A quantidade de carga em *D*, naturalmente, é limitada pela rigidez dielétrica do ar que o envolve. Como sabemos, se a rigidez dielétrica do ar for ultrapassada, parte da carga acumulada em *D* tende a escoar e, portanto, a carga máxima que pode existir em *D* é aquela que cria um campo igual à rigidez dielétrica do ar.

COMO FUNCIONA O GERADOR DE VAN DE GRAEFF

O fato de a carga elétrica se transferir integralmente de um corpo para outro, quando há contato interno, constitui o princípio básico de funcionamento do gerador de Van de Graaff.

Este aparelho é mostrado esquematicamente na fig. 19-20. Observe que ele é constituído por uma correia que passa por duas polias, uma delas acionada por um motor elétrico que faz a correia se movimentar. A segunda polia encontra-se no interior de uma esfera metálica oca, que está apoiada em duas colunas isolantes.

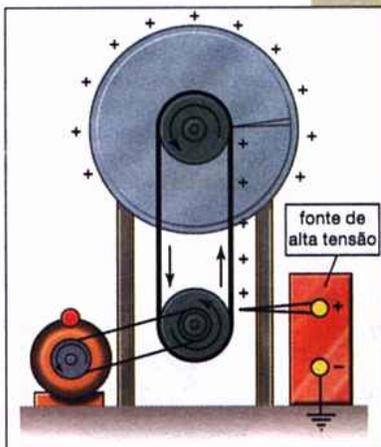


Fig. 19-20: Esquema do gerador de Van de Graaff. As cargas transportadas pela correia para o interior da esfera metálica são totalmente transferidas para ela, acumulando-se em sua superfície externa.



Fig. 19-21: A foto mostra um técnico da Siemens, conhecida empresa alemã de produtos elétricos, testando cabos que serão usados na transmissão de energia elétrica a altas voltagens. Estas condições são obtidas, no laboratório da empresa, usando-se um grande gerador de Van de Graaff, cuja esfera de cor amarela é facilmente identificada na figura.

Enquanto a correia se movimenta, ela recebe carga elétrica por meio de uma ponta ligada a uma fonte de alta tensão (cerca de 10 000 V). Esta carga é transportada pela correia para o interior da esfera metálica. Uma ponta ligada a esta esfera (fig. 19-20) recolhe a carga transportada pela correia. Em virtude do contato interno, esta carga se transfere integralmente para a superfície externa da esfera do gerador.

Como as cargas são transportadas continuamente pela correia, elas vão se acumulando na esfera, até que a rigidez dielétrica do ar seja atingida. Nos geradores de Van de Graaff usados em trabalhos científicos, como aquele mostrado na fotografia da fig. 19-21, o diâmetro da esfera pode ser de alguns metros e a

altura do aparelho atinge, às vezes, 15 m. Nestas condições, é possível obter voltagens de até 10 milhões de volts. Observe que a voltagem obtida no aparelho é cerca de mil vezes maior do que a voltagem fornecida pela fonte que alimenta a correia do gerador.

O GERADOR DE VAN DE GRAFF NOS LABORATÓRIOS DE ENSINO

O gerador de Van de Graaff pode ser construído em pequenas dimensões para ser usado nos laboratórios de ensino. A fotografia 19-22 mostra um desses geradores: o diâmetro de sua esfera mede cerca de 20 cm e pode-se, com ele, obter potenciais de alguns milhares de volts. Geralmente, nestes geradores mais simples, a carga elétrica fornecida à correia não é obtida por meio de uma fonte especial de tensão. Esta carga é desenvolvida na base do próprio aparelho pelo atrito entre a polia e a correia. Além disso, em lugar do motor elétrico, costuma-se usar simplesmente uma manivela para movimentar a polia e a correia. Um gerador como este pode ser construído com relativa facilidade, podendo-se obter, em manuais especializados (guias de laboratório, por exemplo), maiores detalhes sobre o material a ser utilizado e a maneira de montar o aparelho.



Agostinho de Paula

Fig. 19-22: Foto de um gerador de Van de Graaff usado em laboratórios de ensino, com o qual podemos obter potenciais de alguns milhares de volts.

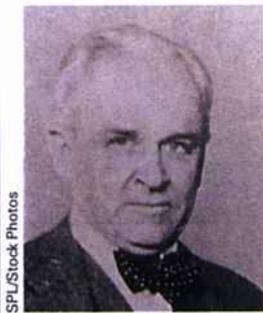
A experiência de Millikan

A carga elétrica é “quantizada”

Vimos, no início de nosso estudo dos fenômenos elétricos, que somente com o desenvolvimento da Física no século XX foi possível entender o mecanismo pelo qual um corpo se eletriza. Como você sabe, após serem estabelecidas as teorias sobre a constituição do átomo, os cientistas concluíram que a eletrização é devida simplesmente ao fato de um corpo ganhar ou perder elétrons.

Por este motivo, o valor da carga elétrica que um corpo possui deve ser sempre um múltiplo inteiro do valor da carga do elétron. Em outras palavras, se desejássemos alterar o valor da carga de um corpo, a mínima variação que poderia ser realizada seria ceder ou retirar dele apenas um elétron. Portanto, o valor da carga de um corpo nunca poderia sofrer uma variação cujo módulo fosse inferior ao módulo da carga desta partícula, isto é, esta variação não poderia ser igual a uma fração da carga do elétron. Sempre que isto ocorre com uma grandeza dizemos que ela é *quantizada*, o que significa que o valor da grandeza só pode variar *em saltos*. O menor valor desta variação, isto é, o menor *salto* que o valor da grandeza pode sofrer, é denominado *quantum* da grandeza. Assim, podemos dizer que a carga elétrica é uma grandeza quantizada e que o *quantum* de carga elétrica é o valor da carga do elétron. Os cientistas do início do século XX já suspeitavam que estas idéias fossem verdadeiras. Nesta época, o cientista americano Robert Millikan realizou várias experiências que realmente comprovaram a quantização da carga elétrica e conseguiu, ainda, determinar o valor da carga do elétron.

Embora as experiências realizadas por Millikan tenham sido muito trabalhosas, absorvendo um período de alguns anos de trabalho deste cientista, as idéias básicas nas quais elas se apóiam são relativamente simples, como mostraremos a seguir.



SPL/Stock Photos

Robert Andrews Millikan (1868-1953)

Físico americano que, após estudar na Universidade de Berlim, voltando à sua terra natal tornou-se professor da Universidade de Chicago. Foi aí que realizou sua célebre experiência da gota de óleo que lhe permitiu medir o valor da carga do elétron. Outro trabalho de Millikan de grande repercussão foi a verificação experimental da equação de Einstein, do efeito fotoelétrico. Através deste trabalho ele obteve um valor muito preciso para a constante de Planck. Millikan recebeu várias homenagens e ocupou vários cargos importantes, salientando-se a representação de seu país na Liga das Nações. Em 1923 recebeu o Prêmio Nobel de Física por seus estudos sobre a carga elementar do elétron e o efeito fotoelétrico.

A fig. 19-23 apresenta um esquema da montagem usada por Millikan. Gotas de óleo, muito pequenas, são lançadas na câmara superior do dispositivo por meio de um pulverizador. Estas gotículas, no próprio processo de sua formação, adquirem uma carga elétrica, geralmente negativa. Millikan desejava medir o valor da carga elétrica nestas gotículas e, para isto, estabeleceu uma diferença de potencial V_{AB} entre as placas A e B mostradas na fig. 19-23. Desta maneira, entre estas placas foi estabelecido um campo elétrico uniforme \vec{E} , cujo módulo, como sabemos, é dado por $E = V_{AB}/d$, onde d é a distância entre as placas. Algumas gotículas, passando através do pequeno orifício existente na placa superior, penetram neste campo, ficando, então, sob a ação de duas forças: o seu próprio peso, $m\vec{g}$, dirigido para baixo, e a força elétrica, $\vec{F} = q\vec{E}$, dirigida para cima (veja a fig. 19-23).

Millikan fazia variar a voltagem V_{AB} até que a gotícula, observada através de uma luneta, ficasse em repouso entre as duas placas. Nesta situação, o valor da força elétrica era igual ao peso da pequena gota de óleo, isto é,

$$qE = mg \quad \text{donde} \quad q = \frac{mg}{E}$$

Como a intensidade do campo elétrico podia ser calculada pela expressão $E = V_{AB}/d$ e como Millikan conhecia a massa m de cada gotícula, ele conseguiu obter o valor da carga q

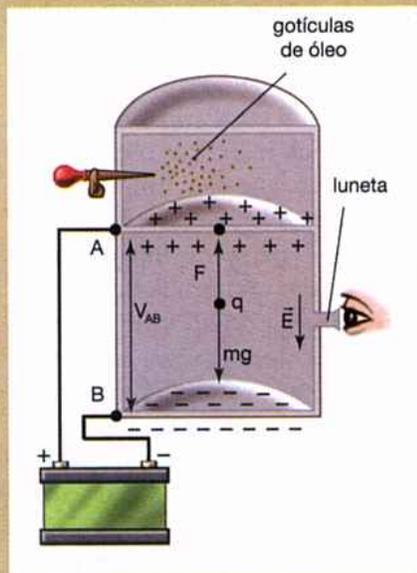


Fig. 19-23: Esquema da montagem usada por Millikan para medir a carga do elétron.

existente em cada pequena gota de óleo. A fotografia 19-24 mostra o próprio Millikan fazendo observações no aparelho que ele construiu para realizar a experiência que acabamos de descrever.

Millikan determina o valor da carga do elétron

No período de 1906 a 1913 Millikan realizou um grande número de experiências, medindo o valor da carga elétrica adquirida por milhares de gotículas de óleo. Os resultados dessas experiências permitiram-lhe concluir que, de fato, a carga elétrica é quantizada, possibilitando também que ele determinasse o valor do *quantum* de carga elétrica (o valor da carga do elétron).

Usando a relação $q = mg/E$ para calcular a carga de diversas gotículas, foram obtidos valores que eram sempre múltiplos de uma dada carga. Esta, por sua vez, representava o menor valor obtido, isto é, nenhuma das gotículas analisadas possuía uma carga de valor inferior a este mínimo. Para esclarecer as conclusões tiradas por Millikan, consideremos os dados seguintes, que representam possíveis valores da carga elétrica, observados em algumas gotículas:

$$1^{\text{a}} \text{ gotícula — } q_1 = 6,4 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$2^{\text{a}} \text{ gotícula — } q_2 = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$3^{\text{a}} \text{ gotícula — } q_3 = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$4^{\text{a}} \text{ gotícula — } q_4 = 8,0 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$5^{\text{a}} \text{ gotícula — } q_5 = 4,8 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Como vemos, o menor valor da carga em uma gota é $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ e todas as outras cargas são múltiplas deste valor mínimo. Millikan concluiu, assim, que a 3ª gotícula tinha adquirido apenas 1 elétron em excesso e, portanto, o valor da carga do elétron era $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Então, nas demais gotículas temos:

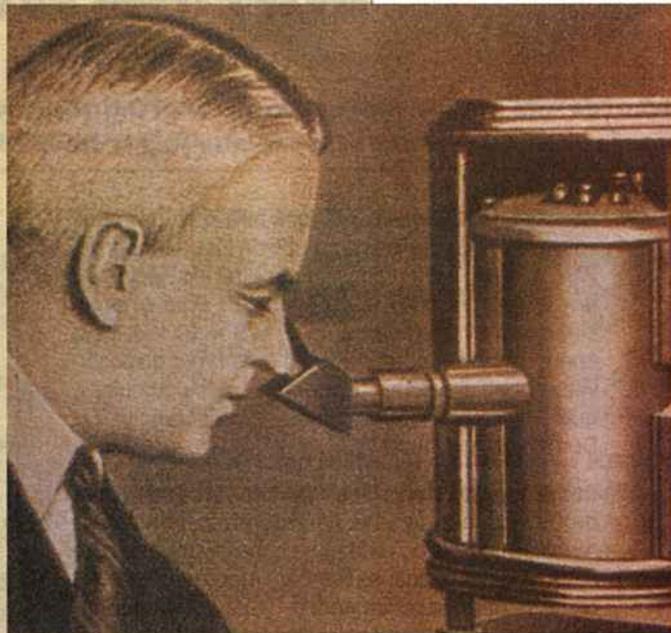
$$1^{\text{a}} \text{ gotícula — 4 elétrons em excesso}$$

$$2^{\text{a}} \text{ gotícula — 2 elétrons em excesso}$$

$$4^{\text{a}} \text{ gotícula — 5 elétrons em excesso}$$

$$5^{\text{a}} \text{ gotícula — 3 elétrons em excesso}$$

Experiências posteriores, realizadas em outros campos da Física, forneceram resultados em perfeita concordância com as conclusões obtidas por Millikan. Por seus trabalhos, principalmente pela determinação do valor da carga do elétron, este cientista recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1923.



ADS

Fig. 19-24: Millikan fazendo observações no célebre aparelho da gota de óleo.

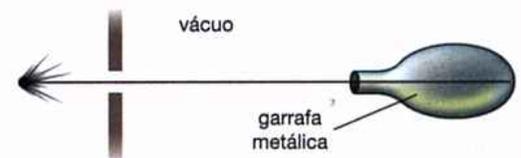
Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

26. Resolvendo este exercício, você terá idéia das altas voltagens necessárias no campo da Física Moderna. Para que um próton consiga penetrar no núcleo de um átomo de ouro, ele deverá ter uma energia cinética mínima próxima de $E_c = 8 \times 10^{-12}$ J. Esta energia cinética é fornecida ao próton por dispositivos conhecidos como "aceleradores de partículas", que aplicam a ele uma diferença de potencial V_{AB} . Determine o valor de V_{AB} .
27. Dez pequenas esferas metálicas, cada uma com carga de $0,1 \mu\text{C}$, são usadas para eletrizar uma esfera metálica oca maior, tocando-a sucessivamente com cada uma das pequenas esferas. Dizer se a carga final na esfera grande será menor ou igual a $1 \mu\text{C}$, supondo que os contatos sucessivos foram feitos:
- Internamente.
 - Externamente.
28. Conforme foi dito no texto, os geradores de Van de Graaff permitem obter potenciais de até 10 milhões de volts. Suponha que a esfera de um certo gerador tenha um raio $R = 1,8$ m.
- Qual a carga que deve ser fornecida a esta esfera para que ela adquira aquele potencial?
 - Se a esfera estivesse no ar, em condições normais, seria possível que ela adquirisse aquele potencial? Explique.
29. Sabe-se que a rigidez dielétrica do ar depende da pressão a que ele está submetido, sendo diretamente proporcional a esta pressão. Em virtude disto, as esferas dos geradores de Van de Graaff costumam ser colocadas em câmaras pressurizadas (contendo ar a alta pressão) para poderem atingir potenciais mais elevados.
- No exercício anterior, qual deve ser a pressão mínima do ar na câmara que envolve a esfera, para que ela possa atingir o potencial de 10 milhões de volts, mencionado?
 - E qual seria a pressão mínima deste ar para que o aparelho pudesse ser usado para acelerar o próton do exercício 26?
30. Suponha que a correia do Van de Graaff do exercício 28 transporte cargas para sua esfera com uma taxa de $50 \mu\text{C/s}$. Quanto tempo seria necessário para o Van de Graaff atingir o potencial de 10×10^6 V, considerado?
31. No exercício anterior, considere que o potencial da esfera do Van de Graaff tenha atingido 10×10^6 V e que, em virtude de "fugas de cargas" para o ar, este potencial se mantenha constante, apesar de a cor-

reia continuar a transportar cargas para a esfera. Qual deve ser a potência do motor que movimenta a correia, para manter a situação descrita? (Despreze as forças de atrito.)

- O que significa dizer que uma grandeza é quantizada?
 - Qual é o valor do *quantum* de carga elétrica?
33. Ao resolver este exercício, você terá uma idéia de como eram extremamente pequenas as gotas de óleo que Millikan usou em suas experiências para obter a carga do elétron. Suponha que em uma dessas experiências, Millikan tenha usado duas placas separadas por uma distância $d = 1,5$ cm, submetidas a uma diferença de potencial $V_{AB} = 600$ V. Considerando que uma gotícula com 5 elétrons em excesso tivesse ficado em equilíbrio entre as placas e lembrando que a carga do elétron é $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C:
- Determine o valor de massa, m , dessa gota (tome $g = 10$ m/s²).
 - Quantas destas gotículas Millikan poderia obter com apenas 1 g de óleo (expresse este número em palavras)?
34. Conforme mencionamos nesta seção, posteriormente à experiência de Millikan, várias outras experiências foram feitas, fornecendo resultados sempre concordantes para o valor da carga do elétron. Este exercício lhe permitirá tomar conhecimento de uma dessas experiências. A figura deste exercício mostra um feixe de elétrons, emitido por um canhão eletrônico, dirigido para o interior de uma garrafa metálica, sendo recolhidos em suas paredes. Em virtude disto, a garrafa vai adquirindo uma carga elétrica negativa. Em uma reprodução desta experiência, com dispositivos modernos (contador de elétrons), mediu-se o número de elétrons emitidos por segundo pelo canhão eletrônico, encontrando-se $1,0 \times 10^8$ elétrons/s. Após decorrido um tempo $t = 5,0$ horas, ao ser medida a carga acumulada na garrafa, verificou-se que tinha um valor de $0,28 \mu\text{C}$. Qual é o valor da carga do elétron que foi obtido com os dados desta experiência? Verifique se este valor está em concordância com o valor encontrado por Millikan.

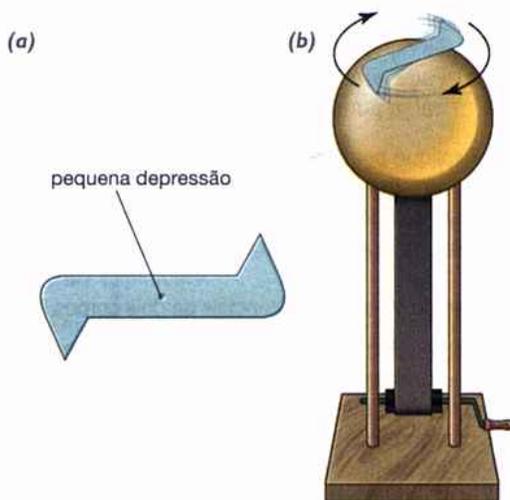


Exercício 34.

Primeira experiência

O poder das pontas (analisado no Tópico Especial do capítulo anterior) pode ser usado para colocar em rotação um pequeno objeto metálico, o qual costuma ser denominado *torniquete elétrico*. Procure construir e colocar em funcionamento um torniquete, de acordo com a orientação seguinte:

- 1º) Corte um pedaço de lata fina com cerca de 5 cm de comprimento, dando-lhe a forma mostrada na figura (a) desta experiência. Em sua parte central, faça uma pequena depressão, como está indicado na figura. Está, então, construído o seu torniquete.
- 2º) Prenda uma agulha no alto da esfera do gerador de Van de Graaff (você poderá usar, por exemplo, uma fita adesiva), certificando-se de que esta agulha esteja em contato com a esfera (veja a figura (b) desta experiência).
- 3º) Apóie a depressão feita no torniquete na ponta da agulha, de modo que ele fique em equilíbrio praticamente na horizontal. Colocando o gerador de Van de Graaff em funcionamento, o torniquete entrará em rotação com uma velocidade relativamente elevada.



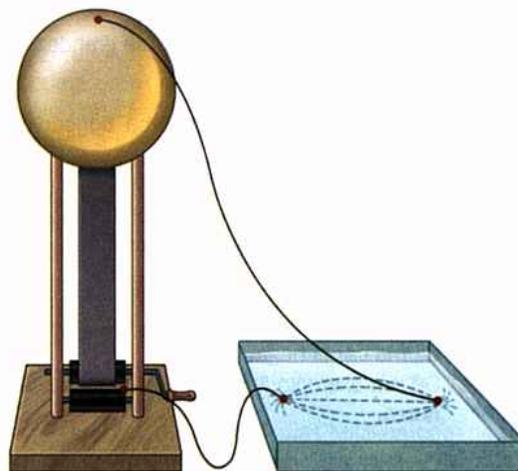
Primeira experiência.

- 4º) O movimento do torniquete, como dissemos, está relacionado com o poder das pontas. Nas proximidades das pontas eletrizadas do torniquete, o ar se ioniza e os íons que possuem carga de mesmo sinal que as pontas são repelidos por elas. Estes íons, por sua vez, repelem as pontas (força de reação), colocando o torniquete em rotação. Observe, em sua experiência, o sentido de rotação do torniquete e verifique se está de acordo com esta explicação.

Segunda experiência

Realizando esta experiência, você poderá visualizar as linhas de força de alguns campos elétricos criados por corpos eletrizados.

- 1º) Coloque, em um recipiente de plástico, um pouco de óleo (de cozinha, por exemplo) e distribua em sua superfície uma certa quantidade de sementes de grama comum, que podem ser encontradas facilmente.
- 2º) Prenda a extremidade de um fio metálico à esfera de um gerador de Van de Graaff (use uma fita adesiva, por exemplo) e adapte à outra extremidade uma pequena esfera metálica (de papel de alumínio, por exemplo), introduzindo-a no recipiente, como mostra a figura desta experiência. Repita o procedimento com outro fio ligado à base do gerador, onde se desenvolve uma carga de sinal contrário ao de sua esfera (veja a figura).



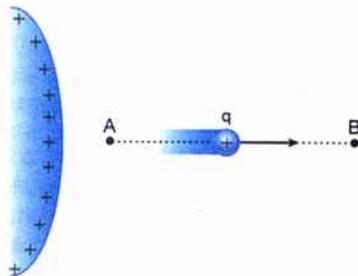
Segunda experiência.

Observação: Se para manter os fios introduzidos no óleo você tiver que segurá-los com as mãos, eles devem ser capeados, para evitar que a carga seja transferida para a Terra.

- 3º) Ponha o gerador para funcionar e observe que as sementes de grama se orientam ao longo das linhas de força, mostrando a configuração do campo elétrico existente entre as pontas dos fios. Procure, no capítulo 18, a figura que apresenta uma configuração de linhas de força semelhante a esta que você observou.
- 4º) Prenda uma placa metálica plana na extremidade de cada um dos fios e mergulhe-as no óleo, de modo que fiquem verticais e paralelas. Observe, agora, como se orientam as sementes de grama. A configuração das linhas de força lhe faz lembrar que este campo é uniforme? Explique sua resposta.
- 5º) Retire a placa da extremidade de um dos fios e mergulhe esta extremidade novamente no óleo. Observe, então, a configuração do campo elétrico existente entre uma placa e uma ponta, eletrizadas com cargas de sinais contrários. Faça um desenho procurando reproduzir as formas das linhas de força para este caso.

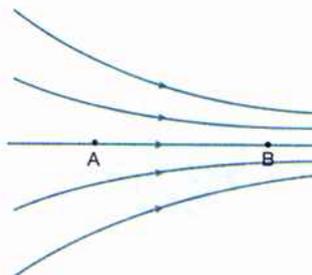
nas e testes problemas e testes problemas e testes

- Suponha que uma lâmpada seja ligada em uma tomada de 120 V durante 1,0 hora.
 - Se em cada segundo passa uma carga de 1,0 C pela lâmpada, qual é o valor da carga total que passou através dela?
 - Qual o trabalho total realizado sobre esta carga pelo campo elétrico existente entre os terminais da tomada?
- Como vimos no problema 4 do capítulo 8, a energia elétrica é geralmente medida em uma unidade denominada 1 quilowatt-hora (1 kWh), cujo valor é $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$. Considerando o problema anterior:
 - Expresse em kWh o trabalho realizado pelo campo elétrico.
 - Supondo que 1 kWh de energia elétrica esteja custando R\$ 0,08, calcule o preço que deveria ser pago pelo funcionamento da lâmpada.
- Uma carga de prova positiva $q = 2,0 \mu\text{C}$ é transportada de A para B sob a ação de um campo elétrico e de uma força externa (veja a figura deste problema). Sabendo-se que esta força externa realiza sobre a carga um trabalho de 0,70 J e que sua energia cinética aumenta de 1,20 J neste deslocamento, determine:
 - O trabalho realizado pelo campo elétrico sobre a carga de prova.
 - A diferença de potencial entre os pontos A e B.



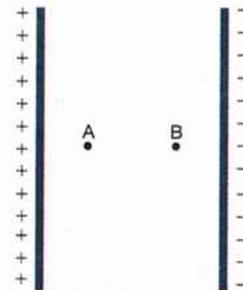
Problema 3.

- A figura deste problema representa as linhas de força de um campo elétrico.



Problema 4.

- Observando estas linhas de força, diga se a intensidade do campo em A é maior, menor ou igual à intensidade do campo em B.
 - Imaginando uma carga positiva abandonada entre A e B, diga se o potencial de A é maior, menor ou igual ao de B.
- Dissemos, neste capítulo, que as unidades 1 N/C e 1 V/m, usadas para medir a intensidade do campo elétrico, são equivalentes. Procure mostrar que esta afirmação é verdadeira, isto é, mostre que $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$ (lembre-se das definições de 1 V e 1 J).
 - Considere a fig. 19-4 e suponha que a distância d entre as placas seja mantida constante. Aumentando-se continuamente o valor da carga em cada placa, verifica-se que o campo entre elas também aumenta.
 - Faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $V_{AB} \times E$ (voltagem entre as placas em função da intensidade do campo).
 - O que representa a inclinação deste gráfico?
 - Os pontos A e B mostrados na figura deste problema estão situados entre duas grandes placas paralelas, eletrizadas com cargas de mesmo valor e de sinais contrários. Sabendo-se que os potenciais de A e B valem (ambos em relação a um mesmo nível) $V_A = 500 \text{ V}$ e $V_B = 100 \text{ V}$ e que a distância de A até B é de 2,0 cm, concluímos que as intensidades do campo elétrico em A e B valem, respectivamente:
 - 500 V/m e 100 V/m.
 - 500 V/m e 250 V/m.
 - 800 V/m e 800 N/C.
 - $2,0 \times 10^4 \text{ V/m}$ e $2,0 \times 10^4 \text{ N/C}$.
 - $2,5 \times 10^4 \text{ V/m}$ e $5,0 \times 10^3 \text{ V/m}$.

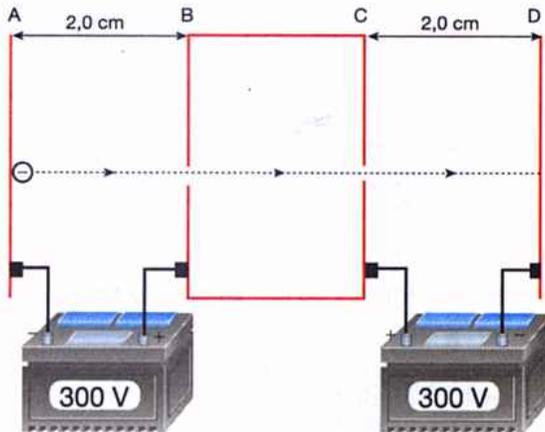


Problema 7.

- No problema anterior, suponha que uma partícula, eletrizada positivamente com uma carga $q = 1,5 \mu\text{C}$, fosse abandonada (em repouso) no ponto A. Considere atuando sobre a partícula

apenas a força devida ao campo elétrico e calcule:

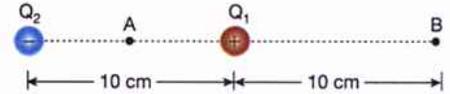
- O trabalho realizado sobre ela, pela força elétrica, no deslocamento de A para B.
 - A energia cinética com que a partícula chega em B.
 - A velocidade da partícula ao passar por B, sabendo-se que sua massa é $m = 3,0$ miligramas.
9. A figura deste problema mostra duas grandes placas metálicas A e D e uma caixa metálica oca cujas faces B e C são paralelas às placas. Duas baterias, de 300 V cada uma, são ligadas às placas e à caixa, da maneira mostrada na figura. Considerando a placa A como nível de potencial, indique, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão *corretas*:
- O campo elétrico entre A e B está dirigido de B para A e vale $1,5 \times 10^4$ V/m.
 - O campo elétrico entre B e C é nulo.
 - O campo elétrico entre C e D está dirigido de C para D e vale $1,5 \times 10^4$ V/m.
 - Os potenciais das faces B e C são ambos iguais a 300 V.
 - O potencial da placa D é zero.



Problema 9.

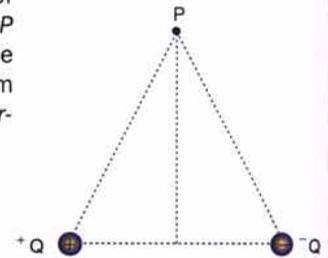
10. Um elétron, abandonado (em repouso) próximo à placa A, segue a trajetória mostrada na figura do problema anterior, passando através de pequenos orifícios existentes em B e C. Analise as afirmativas seguintes e indique aquelas que estão *erradas*:
- Entre A e B o movimento do elétron é retilíneo uniforme.
 - Entre B e C a energia cinética do elétron não varia.
 - Entre C e D o movimento do elétron é uniformemente retardado.
 - Ao atingir a placa D a velocidade do elétron é nula.
 - A velocidade do elétron aumenta continuamente desde A até D.

11. Duas cargas pontuais $Q_1 = 5,0 \mu\text{C}$ e $Q_2 = 2,0 \mu\text{C}$, colocadas no ar, estão separadas por 10 cm (veja a figura deste problema). Sabendo-se que o ponto A está situado no meio do segmento que une Q_1 a Q_2 e que o ponto B dista 10 cm de Q_1 , calcule:
- O potencial do ponto A.
 - O potencial do ponto B.
 - A diferença de potencial entre A e B.



Problema 11.

12. Um ponto P encontra-se à mesma distância de duas cargas pontuais $+Q$ e $-Q$ (veja a figura deste problema). Sendo E a intensidade do campo criado por estas cargas em P e V o potencial que elas estabelecem neste ponto, é *correto* afirmar que:



Problema 12.

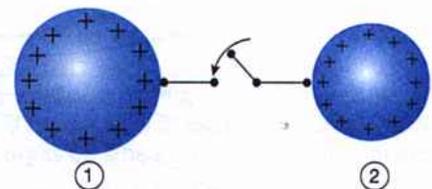
- $E = 0$ e $V = 0$.
- $E \neq 0$ e $V = 0$.
- $E = 0$ e $V \neq 0$.
- $E \neq 0$ e $V \neq 0$.

13. Uma esfera metálica encontra-se eletrizada positivamente, em equilíbrio eletrostático. Sabe-se que o potencial de um ponto da superfície desta esfera vale 800 V e que seu raio é $R = 10$ cm. Podemos, então, concluir que a intensidade do campo E e o potencial V no centro da esfera valem:

- $E = 0$ e $V = 800$ V.
- $E = 0$ e $V = 0$.
- $E = 80$ V/cm e $V = 800$ V.
- $E = 8,0 \times 10^3$ V/m e $V = 0$.
- $E = 800$ V/m e $V = 800$ V.

14. Duas esferas metálicas 1 e 2, de raios R_1 e R_2 , sendo $R_1 > R_2$, estão ambas eletrizadas positivamente (veja a figura deste problema). Ligam-se as esferas por meio de um fio condutor. Após ser atingido o equilíbrio eletrostático, designemos por Q_1 e Q_2 as cargas em cada esfera e V_1 e V_2 o potencial de cada uma. Podemos, então, afirmar que:

- $V_1 > V_2$ e $Q_1 > Q_2$.
- $V_1 > V_2$ e $Q_1 = Q_2$.
- $V_1 = V_2$ e $Q_1 > Q_2$.
- $V_1 = V_2$ e $Q_1 = Q_2$.
- $V_1 < V_2$ e $Q_1 = Q_2$.



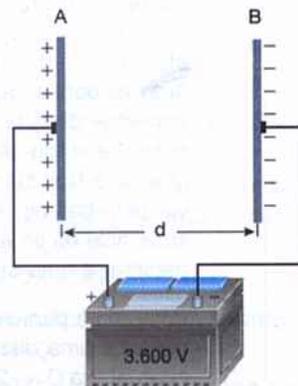
Problema 14.

15. No exemplo resolvido no final da seção 19.4, suponha que a carga inicial na esfera 1 fosse $Q = 6,0 \mu\text{C}$ (lembre-se de que a esfera 2 se encontrava inicialmente descarregada). Se $R_1 = 30 \text{ cm}$ e $R_2 = 10 \text{ cm}$, calcule os valores Q_1 e Q_2 das cargas finais em cada esfera.
16. Se o valor do potencial é constante em todos os pontos de uma certa região do espaço, o que se pode concluir sobre a intensidade do campo elétrico \vec{E} nesta região?
17. Costuma-se medir a energia de partículas atômicas em uma unidade denominada 1 elétron-volt (1 eV). A unidade 1 eV é igual à energia adquirida por um elétron ao ser acelerado entre dois pontos entre os quais existe uma diferença de potencial de 1 V. Considerando esta informação, diga qual será, em eV, a energia adquirida pelas partículas seguintes, ao passarem entre dois pontos A e B, entre os quais existe uma voltagem $V_A - V_B = 20 \text{ kV}$:

Um elétron, ao passar de B para A.
 Um próton, ao passar de A para B.
 Um nêutron, ao passar de A para B.

Uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons), ao passar de A para B.

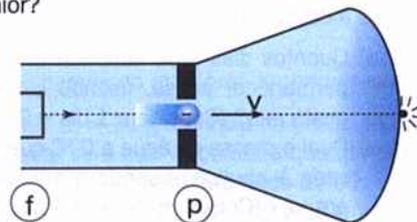
18. Um conjunto de baterias especiais está ligado a duas placas metálicas, estabelecendo entre elas uma diferença de potencial $V_{AB} = 3\,600 \text{ V}$ (veja a figura deste problema). Sabe-se que a voltagem mantida pelas baterias é sempre a mesma, qualquer que seja a distância entre as placas.



Problema 18.

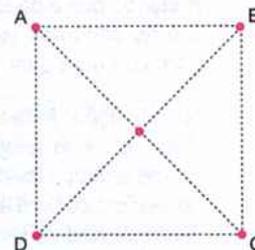
- a) Se aproximarmos uma placa da outra, o que ocorrerá com a intensidade do campo entre elas?
- b) Verifica-se que, se o campo entre as placas alcançar o valor de $3 \times 10^6 \text{ N/C}$, o ar entre elas se torna condutor e observa-se que uma faísca elétrica salta de uma placa para a outra. Então, aproximando-se a placa A da placa B, para qual valor de d uma faísca elétrica saltará entre elas?
19. Em um tubo de TV existem um filamento f e uma placa p (veja a figura deste problema), entre os quais é estabelecida uma certa voltagem V_{pf} . Ao ser aquecido, o filamento emite elétrons (com velocidade praticamente nula) que são acelerados pela diferença de potencial em direção à placa p , passando por um orifício nela existente e deslocando-se até atingirem a tela.

- a) Determine a expressão que fornece a velocidade v do elétron ao passar pelo orifício existente na placa (dê sua resposta em função da carga q do elétron, de sua massa m e da voltagem V_{pf}).
- b) Em um tubo de TV, um elétron, acelerado por uma voltagem $V_{pf} = 15\,000 \text{ V}$, atingiu a placa com uma velocidade v . Qual deveria ser o valor da voltagem entre a placa e o filamento para que o elétron atingisse a placa com uma velocidade duas vezes maior?



Problema 19.

20. Consideremos quatro cargas puntuais, todas de mesmo módulo Q , sendo duas positivas e duas negativas. Descreva como devemos distribuir estas cargas nos vértices do quadrado $ABCD$, mostrado na figura deste problema, de tal modo que a intensidade do campo e o potencial no centro do quadrado sejam ambos nulos.



Problema 20.

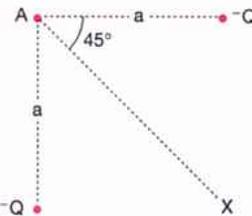
21. Ao se carregar uma bateria, uma carga elétrica total de $2 \times 10^5 \text{ C}$ é transportada de um pólo para o outro, entre os quais existe uma diferença de potencial de 12 V.
- a) Qual a quantidade de energia que é armazenada nesta bateria?
- b) Sabendo-se que a massa da bateria é de 20 kg, a que altura esta bateria poderia ser elevada, se toda a energia que ela armazena fosse usada para realizar este trabalho? (Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.)
22. No problema 19, suponha que a potência elétrica usada para acelerar os elétrons entre f e p (cânion eletrônico) seja de 30 W. Considerando $V_{pf} = 15\,000 \text{ V}$, determine quantos elétrons atingem a tela por segundo.
23. Em uma lâmpada de gás néon (tubo de néon), os eletrodos estão distanciados de 120 cm e a diferença de potencial entre eles é de $8,0 \times 10^3 \text{ V}$.
- a) Calcule a aceleração de um íon de néon cuja massa é $3,2 \times 10^{-26} \text{ kg}$ e cuja carga, em módulo, é igual à carga do elétron (suponha que o campo elétrico entre os eletrodos seja uniforme).
- b) Se o íon parte do repouso no eletrodo positivo e move-se livremente, qual a energia cinética com

- a qual ele alcança o eletrodo negativo? Apresente sua resposta em keV (quilo-elétron-volt) e em joules.
- c) Por que é altamente improvável que o íon alcance o eletrodo negativo com a energia calculada em (b)?
24. O potencial de uma nuvem é de 8×10^6 V em relação ao solo. Ocorrendo um raio, uma carga de 40 C é transferida entre a nuvem e o solo (suponha que o potencial da nuvem mantenha-se constante durante a descarga).
- a) Quantos dias uma lâmpada de 100 W poderia permanecer acesa, usando a energia liberada neste raio? (Considere 1 dia = 9×10^4 s.)
- b) Qual a massa de água a 0°C que poderia ser levada à ebulição usando a energia mencionada em (a)? (Considere 1 cal = 4 J.)
25. Dois condutores esféricos, A e B, de raios $R_A = R$ e $R_B = 2R$, estão isolados e distantes um do outro. As cargas das duas esferas são de mesmo sinal e a densidade superficial de carga de A é duas vezes maior do que a de B. Ligando-se as duas esferas por um fio condutor, verifique se haverá passagem de carga de uma para outra. Explique.

Observação: A densidade superficial de carga elétrica, σ (letra grega sigma), na superfície de um corpo é obtida dividindo-se a carga Q distribuída na superfície por sua área A , isto é: $\sigma = Q/A$ (esta grandeza expressa o valor da carga por unidade de área na superfície).

26. O potencial de uma esfera condutora A, de raio $R_A = 0,50$ cm, é $V_A = 10$ V. Uma segunda esfera B, de raio $R_B = 1,0$ cm, tem um potencial $V_B = 16$ V. Ligando-se as duas esferas por um fio condutor fino, determine o potencial de cada esfera, após ser estabelecido o equilíbrio eletrostático das cargas.
27. No problema 9 considere x a distância de um ponto qualquer até a placa A (considere apenas os pontos situados entre as placas A e D). Usando os valores fornecidos e calculados naquele problema, desenhe o gráfico que mostre como varia com a distância x (tome $BC = 2,0$ cm):
- a) A intensidade E do campo elétrico (considere o valor do campo positivo se \vec{E} apontar para a direita e reciprocamente).
- b) O potencial elétrico V (considere o nível de potencial na placa A).
28. Duas cargas elétricas pontuais $-Q$ estão a uma distância a do ponto A, como mostra a figura deste problema.
- a) A que distância x de A, sobre a reta AX, devemos colocar uma carga elétrica pontual $+Q$, para que o potencial em A (em relação ao infinito) seja nulo?

- b) Existem outros pontos do plano da figura nos quais a carga $+Q$ poderia ser colocada para obter-se o mesmo resultado?



Problema 28. $-Q$

29. Duas esferas metálicas, de mesmo raio, estão inicialmente carregadas com cargas Q_A e Q_B . Estabelecendo-se a ligação entre as esferas, para cada um dos casos seguintes, dizer o sentido do movimento dos elétrons e a carga final em cada uma:
- a) $Q_A = +6,0 \mu\text{C}$ e $Q_B = 0$
- b) $Q_A = +6,0 \mu\text{C}$ e $Q_B = +4,0 \mu\text{C}$
- c) $Q_A = -6,0 \mu\text{C}$ e $Q_B = -4,0 \mu\text{C}$
- d) $Q_A = -6,0 \mu\text{C}$ e $Q_B = +4,0 \mu\text{C}$
30. O núcleo de um átomo de ouro possui uma carga positiva, correspondente a 79 prótons ali presentes. Em suas famosas experiências, Rutherford enviava partículas α (carga positiva correspondente a 2 prótons), com energia cinética de 5 MeV (cinco milhões de elétron-volt = 5 mega-elétron-volt) contra uma lâmina de ouro muito fina. Suponha que a trajetória das partículas α estivesse dirigida diretamente para um núcleo de ouro. Sabendo-se que o raio do núcleo de ouro é igual a $5,0 \times 10^{-15}$ m, verifique se esta partícula vai penetrar no núcleo, se vai apenas tocar sua superfície ou se ela vai se deter (voltando sobre si mesma) a uma distância grande do núcleo.
31. Uma carga puntual $q = -1,0 \mu\text{C}$ é colocada em repouso a uma distância $r = 6,0$ cm de uma carga puntual fixa $Q = -2,0 \mu\text{C}$.
- a) Qual é a energia potencial elétrica da carga q em relação ao infinito?
- b) Abandonando-se q , à medida que ela se desloca, sua E_p aumenta, diminui ou não se altera?
- c) Na ausência de atrito, quando a carga q chega ao infinito, ela possui alguma energia? Explique.
32. Considere um próton fixo em um certo ponto e um elétron muito afastado dele, em repouso. Abandonando-se o elétron e supondo que ele seja atraído pelo próton:
- a) À medida que o elétron se desloca, sua E_p aumenta, diminui ou não se altera? E sua E_c ?
- b) Quando a distância do elétron ao próton for igual a 10^{-10} m (ordem de grandeza do raio do átomo de hidrogênio), qual será sua E_p ? E sua E_c ? (Considere apenas a ordem de grandeza das cargas do próton e do elétron e tome $k_0 = 10^{10} \text{ N} \times \text{m}^2/\text{C}^2$.)

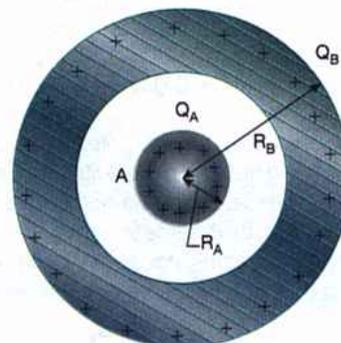
Resolva as questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

Problemas suplementares

- Uma bolha de sabão, de raio $r = 10$ cm e espessura $e = (10/3) \times 10^{-6}$ cm, está eletrizada sendo seu potencial $V = 20$ V. A bolha se arrebenta, formando uma gota com a mesma massa e a mesma carga da bolha original. Considerando a bolha e a gota condutoras, calcule o potencial da gota formada (o volume da película esférica da bolha é dado pela fórmula: $\text{Volume} = 4\pi r^2 \cdot e$).
- Duas placas paralelas, eletrizadas com cargas iguais e de sinais contrários, estão separadas de 10 cm. Um elétron, abandonado próximo à placa negativa, gasta $5,0 \times 10^{-8}$ s para atingir a placa positiva. Calcule a diferença de potencial entre as duas placas.
- Qual o máximo potencial que pode ser alcançado por uma esfera condutora, de raio $R = 0,50$ m, no ar?
- Suponha que em um certo ponto do espaço, onde há um campo elétrico, o potencial tenha um valor negativo.
 - Aproximando-se deste ponto uma carga puntual negativa, o valor do potencial no ponto aumenta, diminui ou não se modifica?
 - E se a carga puntual fosse positiva?
- Considere uma esfera metálica, de raio R , eletrizada com a carga negativa $-Q$.
 - À medida que nos afastamos da superfície da esfera, os potenciais dos pontos pelos quais estamos passando são crescentes ou decrescentes?
 - Onde se localiza o ponto de potencial máximo e qual o valor deste potencial?
 - Faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $V \times r$, onde r é a distância de um ponto qualquer ao centro da esfera (de $r = 0$ até $r \rightarrow \infty$).
- Dois cargas puntuais, ambas positivas, $Q = 5,0 \times 10^{-6}$ C e $q = 2,0 \times 10^{-7}$ C, estão situadas sobre um plano horizontal liso, separadas por uma distância $r = 5,0$ cm.
 - Qual a energia potencial elétrica da carga q , nesta posição? (Considere o nível no infinito.)
 - Mantendo fixa a carga Q e abandonando-se q , qual será sua energia cinética ao passar por um ponto a 15 cm de Q ?

- Para as cargas do problema anterior, responda:
 - Se $m = 10$ g a massa da partícula de carga q , qual será sua velocidade quando ela alcançar um ponto muito afastado de Q ?
 - Se a carga Q não tivesse sido mantida fixa, a velocidade de q , naquele ponto, seria maior, menor ou igual ao valor obtido em (a)? Explique.
- A figura deste problema mostra uma esfera A , condutora, carregada com uma carga positiva Q_A , envolvida por uma esfera oca, B , também condutora, carregada com uma carga positiva Q_B . Sendo R_A e R_B os raios das duas esferas:
 - Determine o potencial V_A da esfera A .
 - Determine o potencial V_B da esfera B .
 - Usando as respostas das questões (a) e (b), explique o que ocorre com a carga Q_A quando as duas esferas são ligadas por um fio condutor.
 - Qual o aparelho, descrito em nosso curso, cujo funcionamento utiliza o fato analisado na questão (c)?



Problema suplementar 8.

- Em um tubo de TV, um elétron é acelerado horizontalmente, a partir do repouso, por uma diferença de potencial de 10 000 V. Em seguida ele é lançado entre duas placas horizontais, com 5,0 cm de comprimento, separadas de 1,0 cm (veja a figura deste problema). Sabendo-se que entre as placas existe uma diferença de potencial de 200 V, ao emergir das placas, o elétron apresenta um ângulo de deflexão θ , em relação

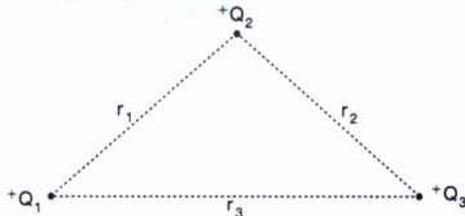
à direção inicial de seu movimento. Determine o valor do ângulo θ .



Problema suplementar 9.

10. a) Um próton, após ser acelerado por uma voltagem V_{AB} , é usado para bombardear os átomos de uma lâmina de ferro. Qual deve ser o mínimo valor de V_{AB} para que o próton consiga penetrar no núcleo de um átomo de ferro? (O raio deste núcleo é 4×10^{-15} m e o número atômico do ferro é 26.)
b) Qual deveria ser o valor de V_{AB} se a partícula a ser acelerada fosse uma partícula α ?
11. Em uma experiência, semelhante à experiência de Millikan, analisada neste capítulo, as duas placas estão separadas por uma distância $d = 2$ cm. As gotas, com raio $R = 2 \times 10^{-4}$ cm, eram obtidas com óleo de densidade $\rho = 0,8$ g/cm³. Sabendo-se que em uma dada gota havia 2 elétrons em excesso, responda:
a) Qual a diferença de potencial que deveria ser aplicada às placas, para manter esta gota em equilíbrio? (Tome $\pi = 3$ e $g = 10$ m/s².)
b) Esta diferença de potencial poderia ser aplicada às placas sem que houvesse descarga elétrica no ar entre elas?
12. Três cargas positivas, Q_1 , Q_2 e Q_3 , são colocadas nas posições mostradas na figura deste problema e mantidas nessas posições. Calcule a energia potencial armazenada neste sistema, em relação a um nível no infinito. Considere os seguintes valores: $Q_1 = 1,0$ μ C, $Q_2 = 3,0$ μ C, $Q_3 = 6,0$ μ C, $r_1 = 3,0$ cm, $r_2 = 5,0$ cm e $r_3 = 6,0$ cm.

Observação: A energia potencial do sistema (a energia que o sistema poderá liberar se as cargas forem abandonadas) pode ser obtida calculando-se o trabalho que deve ser feito para trazer as cargas do infinito até a configuração mostrada (suponha as cargas transportadas uma de cada vez).



Problema suplementar 12.

Observação: Você só poderá resolver os problemas 13, 14 e 15 após ter estudado cálculo diferencial em seu curso de Matemática.

13. Em um ponto, situado a uma distância x de uma carga puntual positiva $+Q$, é estabelecido um potencial $V(x)$, cujo valor, como sabemos, é função de x (veja a figura deste problema).

- a) Usando seus conhecimentos de cálculo diferencial, obtenha a expressão de dV/dx (derivada de V em relação a x).
- b) Comparando a resposta de (a) com a expressão da intensidade do campo, $E(x)$, no ponto x , estabeleça uma relação entre dV/dx e $E(x)$.



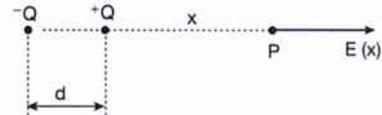
Problema suplementar 13.

14. A figura deste problema mostra um dipolo elétrico, isto é, duas cargas, $+Q$ e $-Q$, separadas por uma distância d . Consideremos um ponto P , situado sobre a reta que passa pelas cargas, a uma distância x do ponto situado no meio das cargas. Pode-se mostrar que, se o ponto P estiver muito afastado do dipolo ($x \gg d$), o valor do potencial estabelecido pelo dipolo em P é:

$$V(x) = k_0 \frac{Qd}{x^2}$$

Sabendo-se que a relação entre $E(x)$ e dV/dx , estabelecida no problema anterior, é geral, determine a expressão da intensidade do campo $E(x)$, que o dipolo cria no ponto P , suposto muito afastado.

Observação: Ao resolver este problema, você verá que é bastante fácil obter a expressão matemática que fornece a intensidade de um campo elétrico, se for conhecida a expressão do potencial neste campo (o cálculo direto do campo, geralmente, é mais trabalhoso).

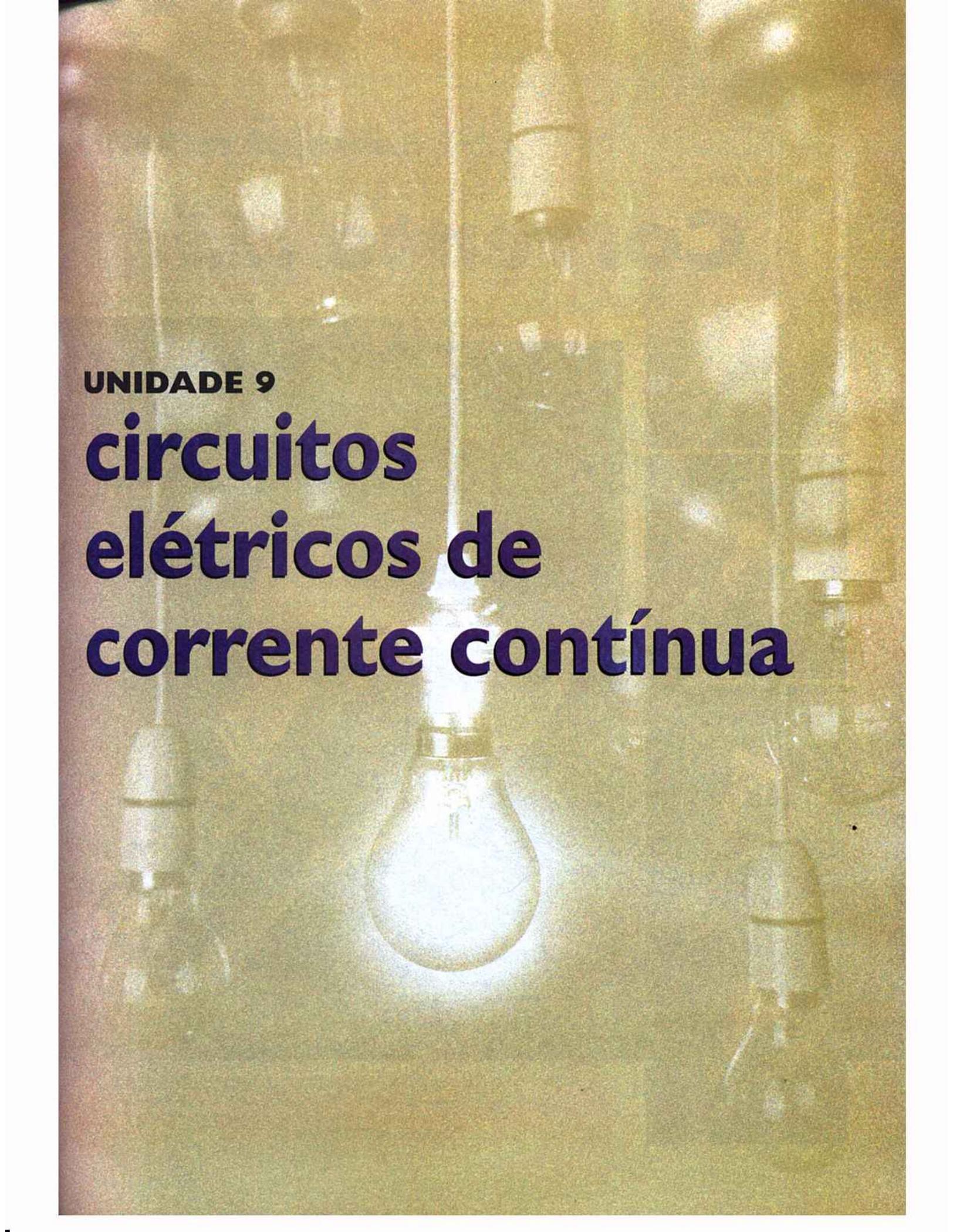


Problema suplementar 14.

15. No problema suplementar 9, do capítulo anterior, vimos que em um ponto situado sobre o eixo de um anel de raio R , eletrizado com uma carga $+Q$, a uma pequena distância x do centro deste anel ($x \ll R$), a intensidade do campo é dada por

$$E(x) = k_0 \frac{Qx}{R^3}$$

Tendo em vista a relação fornecida no problema suplementar 13 entre $E(x)$ e dV/dx , procure determinar, por tentativa, a expressão do potencial, $V(x)$, em um ponto qualquer do eixo do anel, próximo ao seu centro (observe que a expressão procurada deve ser tal que sua derivada, com o sinal trocado, fornecerá a intensidade do campo).

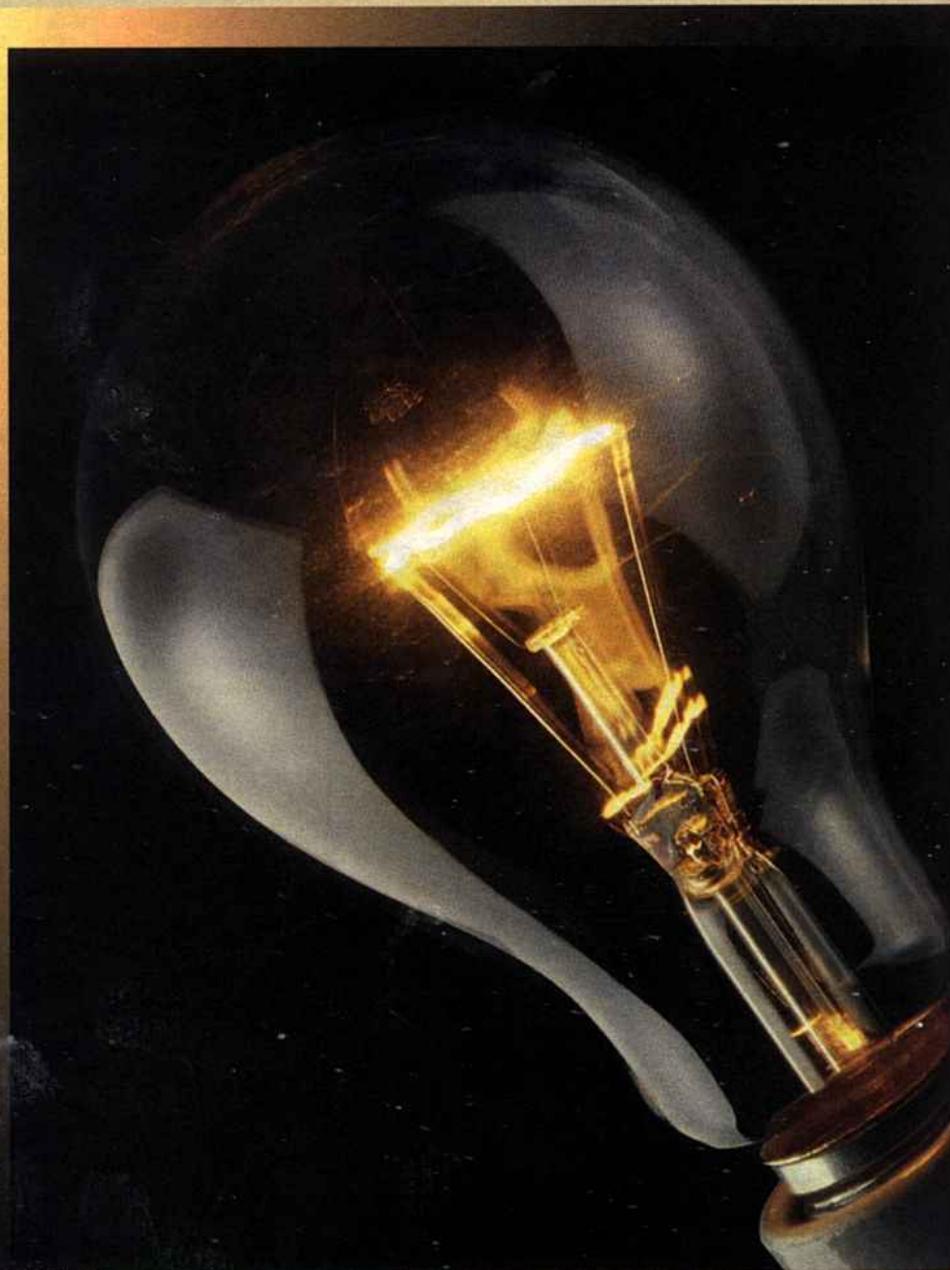
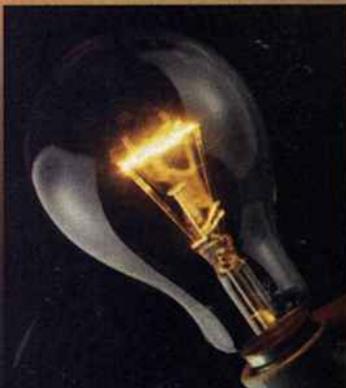
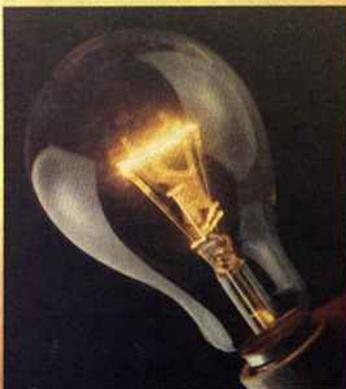
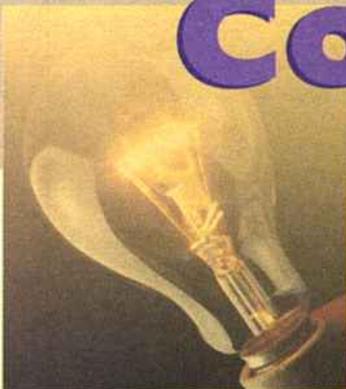


UNIDADE 9

circuitos elétricos de corrente contínua

capítulo 20

Corrente elétrica



Laurení Fochetto

Um efeito muito conhecido da corrente elétrica é o aquecimento que ela provoca no filamento metálico que a transporta. Em uma lâmpada, o aquecimento é tão intenso que o filamento emite luz.

20. I. Corrente elétrica

Conforme dissemos ao iniciar nosso curso de Eletricidade, na Unidade 8 que acabamos de estudar, lidamos com cargas elétricas quase sempre em repouso. Em outras palavras, até o capítulo anterior estávamos trabalhando com fenômenos que pertencem ao campo da Eletrostática.

Neste capítulo, iniciaremos uma nova unidade, na qual analisaremos fenômenos elétricos relacionados com cargas em movimento, isto é, estamos começando o estudo das correntes e circuitos elétricos.

O QUE É UMA CORRENTE ELÉTRICA

Considere um fio metálico no qual foi estabelecido um campo elétrico \vec{E} , como mostra a fig. 20-1. Este campo elétrico pode ser estabelecido, por exemplo, ligando-se as extremidades do fio aos pólos de uma pilha ou bateria, como veremos na secção seguinte.

Sabemos que no fio condutor existe um grande número de elétrons livres. Estes elétrons ficarão sob a ação de uma força elétrica devida ao campo \vec{E} , e, sendo eles livres, entrarão imediatamente em movimento. Como os elétrons possuem carga negativa, este movimento terá sentido contrário ao do campo aplicado, como mostra a fig. 20-1. Portanto, o estabelecimento de um campo elétrico em um fio metálico provoca um fluxo de elétrons neste condutor, fluxo este que é denominado *corrente elétrica*.

Uma corrente elétrica pode ser estabelecida também em condutores líquidos. Consideramos, por exemplo, uma solução de NaCl em água. Como você já deve saber de seu curso de Química, o sal dá origem a íons positivos (Na^+) e íons negativos (Cl^-) que ficam livres, podendo se deslocar no interior do líquido. Estabelecendo-se um campo elétrico na solução (isto pode ser obtido introduzindo-se nela duas placas metálicas ligadas a uma bateria), os íons positivos passam a se deslocar no sentido do vetor \vec{E} e os íons negativos em sentido contrário (fig. 20-2). Portanto, a corrente elétrica em um condutor líquido é constituída pelo movimento de íons positivos e íons negativos, deslocando-se em sentidos contrários.

É possível, ainda, estabelecer correntes elétricas nos gases, como acontece nas lâmpadas de vapor de mercúrio ou quando uma faísca elétrica salta de um corpo para outro através do ar. Nestes casos, a corrente é constituída pelo movimento de íons positivos, de íons negativos e também de elétrons livres.

Em resumo, podemos então dizer:

quando um campo elétrico é estabelecido em um condutor qualquer, as cargas livres aí presentes entram em movimento sob a ação deste campo. Dizemos que este deslocamento de cargas constitui uma corrente elétrica. Nos metais, a corrente elétrica é constituída por elétrons livres em movimento. Nos líquidos, as cargas livres que se movimentam são íons positivos e íons negativos enquanto, nos gases, são íons positivos, íons negativos e também elétrons livres.

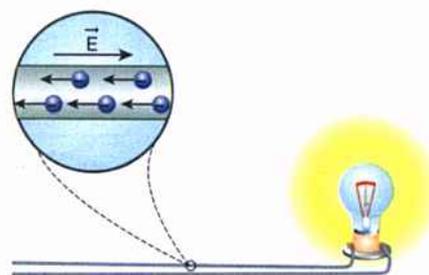


Fig. 20-1: Em um metal a corrente elétrica é constituída por elétrons que se movem em sentido contrário ao campo aplicado. Ilustração esquemática.

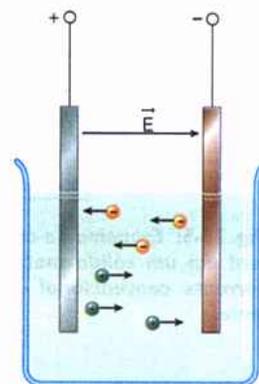


Fig. 20-2: Ilustração esquemática. Em um condutor líquido temos íons positivos movimentando-se no sentido do campo e íons negativos, em sentido contrário.

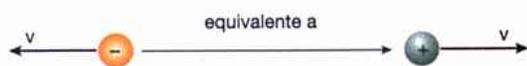


Fig. 20-3: Ilustração esquemática. Uma carga negativa movendo-se em um certo sentido equivale a uma carga positiva, de mesmo valor, movendo-se em sentido contrário.

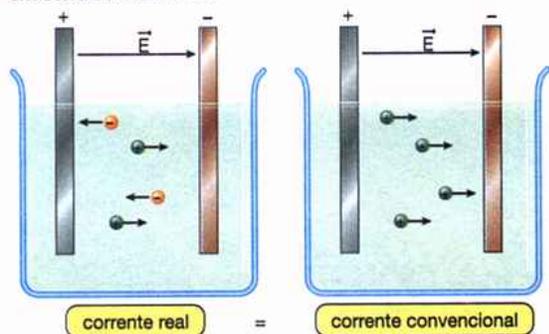


Fig. 20-4: Esquema de corrente real em um líquido e corrente convencional equivalente.

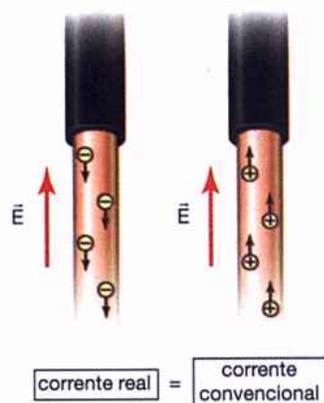


Fig. 20-5: Esquema de corrente real em um sólido metálico e corrente convencional equivalente.

CORRENTE CONVENCIONAL

Suponha uma carga negativa movendo-se com uma certa velocidade dirigida, por exemplo, para a esquerda (fig. 20-3). Verifica-se que este movimento é equivalente ao movimento de uma carga positiva, de mesmo valor, deslocando-se com a mesma velocidade, porém em sentido contrário.

Esta constatação levou os físicos a estabelecerem a convenção seguinte que iria facilitar o estudo das correntes elétricas: *uma carga negativa em movimento será sempre imaginada como se fosse uma carga positiva movendo-se em sentido contrário*. Em virtude desta convenção, em uma corrente elétrica qualquer, as cargas negativas em movimento deverão ser substituídas, em nossa imaginação, por cargas positivas movendo-se em sentido contrário. Então, pode-se supor que qualquer corrente elétrica seja constituída apenas por cargas positivas. Esta corrente imaginária, que é equivalente à corrente real, é denominada *corrente convencional*.

A fig. 20-4 mostra a corrente elétrica real em um líquido, na qual temos íons positivos e negativos em movimento, e a corrente convencional (imaginária) equivalente à real, constituída apenas por cargas positivas em movimento.

Em um condutor metálico, sabemos que a corrente real é constituída por elétrons em movimento. Entretanto, vamos imaginá-la substituída pela corrente convencional, de cargas positivas, movendo-se no sentido do campo elétrico, como mostra a fig. 20-5.

Em nosso curso, quando nos referimos a uma corrente elétrica, fica estabelecido que estamos tratando da corrente convencional, a não ser que seja especificado o contrário.

INTENSIDADE DA CORRENTE

Na fig. 20-6 está representado um fio condutor no qual foi estabelecida uma corrente elétrica (na figura está representada a corrente convencional).

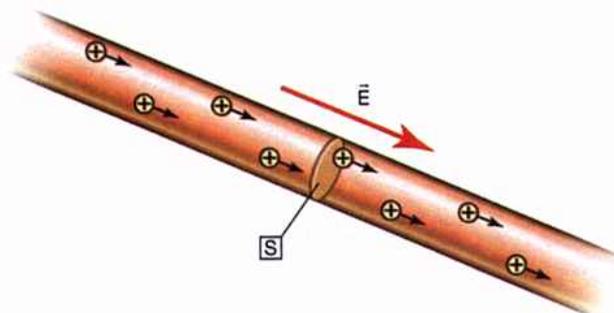


Fig. 20-6: A intensidade da corrente elétrica é a medida da quantidade de carga que passa, por unidade de tempo, através de uma secção do condutor.

Considere uma secção S qualquer do condutor e suponha que uma pessoa observasse, durante um intervalo de tempo Δt , a quantidade de carga que passou através desta secção. Representemos por ΔQ esta quantidade de carga. Denominase *intensidade da corrente* através da secção S a relação entre a quantidade de carga ΔQ e o intervalo de tempo Δt . Designando por i esta grandeza temos, então

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

André-Marie Ampère (1775-1836)

Físico francês, nascido em Lyon, foi um dos fundadores do Eletromagnetismo. Criança prodígio que dominava a Matemática aos 12 anos, tornou-se mais tarde professor desta disciplina, além de lecionar também Física e Química em escolas superiores de seu país. Embora não fosse um estudioso sistemático, Ampère desenvolveu uma grande obra em seus momentos de brilhante inspiração. Além de estabelecer uma lei fundamental do Eletromagnetismo (a lei de Ampère), realizou várias experiências que permitiram desenvolver a teoria matemática dos fenômenos eletromagnéticos já observados e a previsão de outros fenômenos. Foi a primeira pessoa a utilizar técnicas de medidas elétricas, tendo construído um instrumento que foi o precursor dos aparelhos de medida hoje conhecidos.



Hulton/Getty Images

Observe que quanto maior for a quantidade de carga que passar através da secção, durante um certo tempo, maior será a intensidade da corrente naquela secção. Em outras palavras, a intensidade da corrente nos informa sobre a quantidade de carga que passa na secção por unidade de tempo.

É evidente que, no S.I., a unidade de intensidade da corrente será 1 C/s. Esta unidade é denominada 1 ampère = 1 A, em homenagem ao físico francês André-Marie Ampère, que viveu no século XIX e contribuiu significativamente para o desenvolvimento do Eletromagnetismo. Assim, temos

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

Portanto, se em uma secção de um condutor tivermos uma corrente de 1 A, isto significa que, nesta secção, está passando uma carga de 1 C durante 1 s.

É importante, pois, destacar:

quando uma quantidade de carga ΔQ passa através da secção de um condutor, durante um intervalo de tempo Δt , a intensidade i da corrente nesta secção é a relação entre ΔQ e Δt , ou seja

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

CORRENTE CONTÍNUA E CORRENTE ALTERNADA

Vimos que a aplicação de um campo elétrico \vec{E} em um fio condutor estabelece neste fio uma corrente elétrica, cujo sentido (convencional) é o mesmo do vetor \vec{E} . Então, se o sentido do campo elétrico aplicado permanecer sempre o

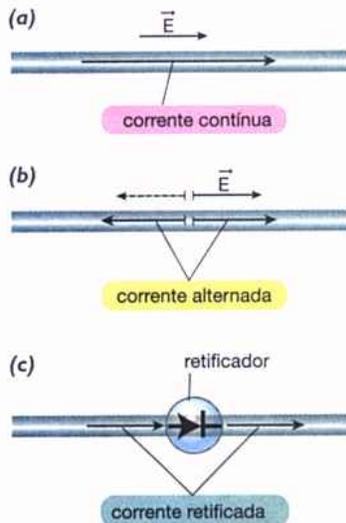


Fig. 20-7: Representação esquemática de corrente contínua (a), corrente alternada (b) e retificador de corrente (c).

mesmo, o sentido da corrente também se manterá inalterado, isto é, as cargas se deslocarão sempre em um mesmo sentido ao longo do fio. Uma corrente elétrica como esta é denominada *corrente contínua* (fig. 20-7-a). As correntes contínuas são fornecidas, por exemplo, pelas pilhas (usadas em lanternas, rádios, etc.) ou pelas baterias de automóvel.

Entretanto, as correntes elétricas distribuídas pelas grandes companhias elétricas, em quase todas as cidades do mundo, *não* são correntes contínuas. Quando você liga um aparelho elétrico em uma tomada de sua casa, o campo elétrico estabelecido no fio condutor muda periodicamente de sentido (fig. 20-7-b). Conseqüentemente, as cargas elétricas no fio oscilarão, deslocando-se ora em um sentido, ora em sentido contrário. Então, a corrente elétrica (assim como o campo) muda periodicamente de sentido, sendo, por este motivo, denominada *corrente alternada*. A frequência de uma corrente alternada é, normalmente, igual a 60 hertz, isto é, nestas correntes as cargas elétricas no condutor executam 60 vibrações completas (60 ciclos) em cada segundo.

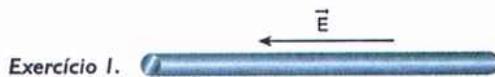
No capítulo 24 veremos por que a distribuição de energia pelas companhias de eletricidade é feita por meio de correntes alternadas e aprenderemos como este tipo de corrente é produzido nos geradores das grandes usinas (geradores de corrente alternada).

Uma corrente alternada pode ser transformada em corrente contínua por meio de dispositivos especiais, denominados *retificadores*. Estes dispositivos são representados pelo símbolo mostrado na fig. 20-7-c e quando são introduzidos em um fio condutor no qual existe uma corrente alternada, esta se transforma em uma corrente contínua.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Um campo elétrico \vec{E} , apontando para a esquerda, é aplicado em um fio condutor, como mostra a figura deste exercício.
 - Qual será o sentido da corrente de elétrons no fio?
 - Qual é o sentido da corrente convencional neste fio?



- Suponha que fosse possível contar o número de elétrons que passam através de uma seção de um condutor no qual se estabeleceu uma corrente elétrica. Se durante um intervalo de tempo $\Delta t = 10$ s passam $2,0 \times 10^{20}$ elétrons nesta seção, determine:
 - A quantidade de carga ΔQ , em coulombs, que corresponde a este número de elétrons (carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C).
 - A intensidade da corrente (em ampère) que passa na seção do condutor.

- A intensidade da corrente que foi estabelecida em um fio metálico é $i = 400$ mA (1 mA = 1 miliampère = 10^{-3} A). Supondo que esta corrente foi mantida, no fio, durante 10 minutos, calcule:
 - A quantidade total de carga que passou através de uma seção do fio.
 - O número de elétrons que passou através desta seção.
- Na fig. 20-2, considere uma seção plana passando pelo meio do recipiente que contém a solução. Durante um intervalo de tempo de 15 s, observa-se que os íons positivos transportam 30 C de carga, da esquerda para a direita, através desta seção. Neste mesmo intervalo de tempo, os íons negativos transportam também 30 C através da seção da direita para a esquerda.
 - Qual é o sentido da corrente convencional na solução?
 - Qual é a intensidade desta corrente convencional através da seção?

20.2. Circuitos simples

PILHA SECA

Dissemos, na seção anterior, que um campo elétrico pode ser estabelecido no interior de um fio condutor ligando-se as extremidades deste fio aos pólos de uma pilha. Isto ocorre porque a pilha é um dispositivo capaz de manter uma diferença de potencial entre estes pólos, graças a reações químicas que se processam em seu interior.

Por exemplo, em uma pilha seca comum (usada em lanternas, rádios, etc.), a extremidade *A* mostrada na fig. 20-8-a encontra-se em um potencial mais alto do que a base *B* desta pilha. Como você deve saber, a voltagem entre pontos, nesta pilha, é cerca de 1,5 V. A extremidade *A* é denominada *pólo positivo* (potencial mais alto), enquanto a base *B* é o *pólo negativo* (potencial mais baixo). A título de ilustração apresentamos, na fig. 20-8-b, um “corte” de uma pilha seca, no qual destacamos alguns de seus componentes. Observe que o pólo positivo é um bastão de carvão e o pólo negativo é o invólucro de zinco.

Existem vários outros tipos de pilhas, nas quais as mais diversas substâncias são usadas em sua construção. Entretanto, em geral, a diferença de potencial entre os pólos destas pilhas é mantida graças à energia liberada em reações químicas, como ocorre no interior da pilha seca. Na fig. 20-8-c mostramos o símbolo usado para se representar uma pilha qualquer: o pólo positivo é representado pelo traço maior, enquanto o traço menor representa o pólo negativo.

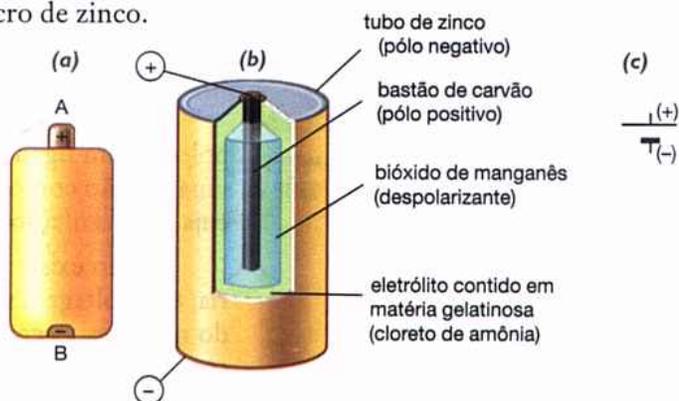


Fig. 20-8: A pilha seca mostrada em (a) e (b) é representada da maneira mostrada em (c).

ASSOCIAÇÃO DE PILHAS

Vimos que a voltagem fornecida por uma pilha seca é 1,5 V. Entretanto, é possível associar várias pilhas secas de modo a se obter uma voltagem mais elevada. Esta associação é obtida ligando-se as pilhas da maneira mostrada na fig. 20-9-a: o pólo positivo da pilha 1 é ligado ao pólo negativo da pilha 2; o pólo positivo desta é, por sua vez, ligado ao pólo negativo da pilha 3 e assim sucessivamente. Quando várias pilhas são ligadas desta maneira dizemos que elas estão *associadas em série*.

É fácil perceber que, com esta associação, conseguimos obter voltagens mais elevadas. De fato, na fig. 20-9-a, ao passarmos do pólo (-) da pilha 1 para o seu pólo (+), o potencial se eleva de 1,5 V. Como este pólo está em contato com o pólo (-) da pilha 2, eles estarão no mesmo potencial. Assim, ao passarmos para o pólo (+) da pilha 2, teremos uma elevação adicional de 1,5 V no potencial. Do mesmo modo, o pólo (+) da pilha 2 está no mesmo potencial que o pólo (-) da pilha 3 (estão em contato). Como o potencial se eleva de 1,5 V ao atravessarmos a pilha 3, é claro que a voltagem entre os pontos *A* e *B* da fig. 20-9-a será:

$$V_{AB} = 1,5 \text{ V} + 1,5 \text{ V} + 1,5 \text{ V} \quad \text{donde} \quad V_{AB} = 4,5 \text{ V}$$

Uma associação em série de pilhas, como esta que acabamos de analisar, é representada da maneira mostrada na fig. 20-9-b. Você certamente já teve oportunidade de montar uma associação deste tipo, em lanternas, rádios, brinquedos elétricos, etc., cujo funcionamento exige uma voltagem superior a 1,5 V.

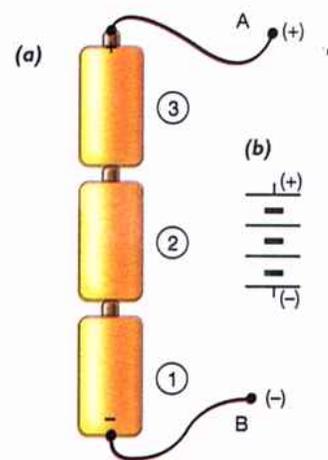


Fig. 20-9: Esquema de associação de pilhas para obter voltagens mais elevadas.

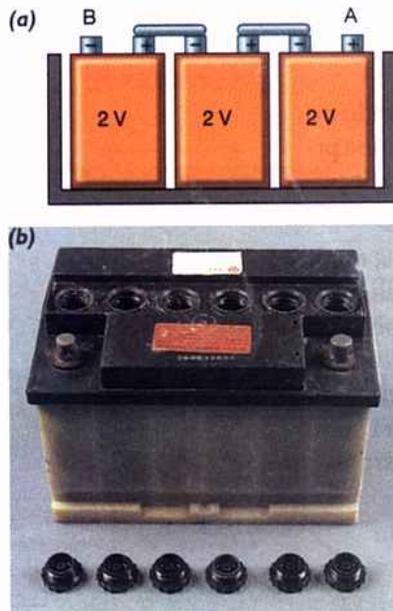


Fig. 20-10: A bateria usada nos automóveis (foto abaixo) é uma associação de pilhas de chumbo (esquema a).

BATERIA DE AUTOMÓVEL

As baterias de automóvel são associações semelhantes àquela que acabamos de analisar. Entretanto, as pilhas usadas nesta associação têm constituição diferente da pilha seca: seus pólos são placas de Pb mergulhadas em uma solução de ácido sulfúrico. A voltagem entre estes pólos é aproximadamente igual a 2 V.

Uma bateria é construída associando-se, em série, algumas destas pilhas e colocando-as no interior de um invólucro resistente, como você já deve ter visto. Na fig. 20-10-a mostramos uma bateria constituída por três pilhas, obtendo-se, então, uma voltagem $V_{AB} = 6$ V.

Se desejássemos obter uma bateria de 12 V, por exemplo, deveríamos associar seis pilhas de maneira semelhante ao que foi feito na fig. 20-10-a. Observe que a bateria mostrada na fotografia 20-10-b contém seis pilhas, fornecendo, portanto, uma voltagem de 12 V.

CIRCUITO ELÉTRICO SIMPLES

Na fig. 20-11-a apresentamos uma bateria (ou uma pilha) cujos pólos foram ligados por meio de um fio condutor. Quando fazemos uma ligação como esta, dizemos que construímos um *circuito elétrico*, cuja representação esquemática está mostrada na fig. 20-11-b.

Como existe uma diferença de potencial entre os pólos da bateria, esta voltagem será estabelecida nas extremidades do fio. Lembrando que, nestas condições, um campo elétrico será criado dentro do condutor, as cargas livres neste condutor entrarão em movimento, isto é, teremos uma corrente elétrica passando no fio. O sentido (convencional) desta corrente no fio será aquele indicado na fig. 20-11, pois as cargas positivas tendem a se deslocar de onde o potencial é maior para onde ele é menor. Portanto, sempre que ligamos os pólos de uma pilha ou bateria por meio de um condutor, será estabelecida neste condutor uma corrente, cujo sentido (convencional) é do pólo positivo para o pólo negativo.

Quando a corrente chega ao pólo negativo, as cargas são forçadas, devido a reações químicas, a se deslocarem no interior da bateria, passando para o pólo positivo, o que completa o circuito. Prosseguindo em seu movimento, as cargas continuam a se deslocar no fio, indo novamente do pólo positivo para o pólo negativo. Enquanto as reações químicas mantiverem a diferença de potencial entre os pólos da bateria, teremos uma corrente circulando continuamente da maneira que acabamos de descrever.

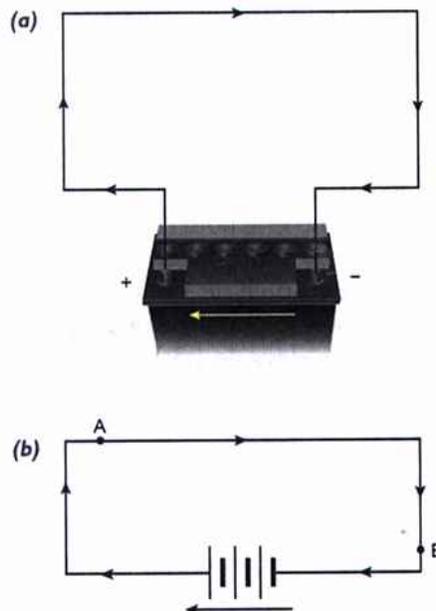


Fig. 20-11: Quando ligamos os pólos de uma bateria por um fio condutor (a), uma corrente elétrica é estabelecida neste fio (b). Ilustração esquemática.

COMENTÁRIOS

- 1) Consideremos, no circuito mostrado na fig. 20-11, duas secções quaisquer, A e B , do fio. Designando por i_A e i_B as intensidades da corrente nestas secções, verifica-se que elas são iguais, isto é,

$$i_B = i_A$$

Este resultado é facilmente justificado, uma vez que, no deslocamento de A para B , não há desvio nem acúmulo de cargas. Logo, o número de elétrons que passa em A , durante 1 s, deve ser igual ao número de elétrons que passa em B neste mesmo intervalo de tempo.

Pode-se entender melhor a afirmação anterior fazendo-se uma analogia com o escoamento de água em uma tubulação. Suponha uma bomba produzindo uma circulação de água em um cano, como mostra a fig. 20-12. Se em uma certa secção A do cano tivermos um fluxo de água igual a 10 L/s, o valor do fluxo deste líquido neste mesmo instante, através da secção B , terá que ser também igual a 10 L/s (a não ser que o cano esteja furado).

Portanto, retornando à fig. 20-11, podemos concluir que a intensidade da corrente tem o mesmo valor em qualquer secção do circuito.

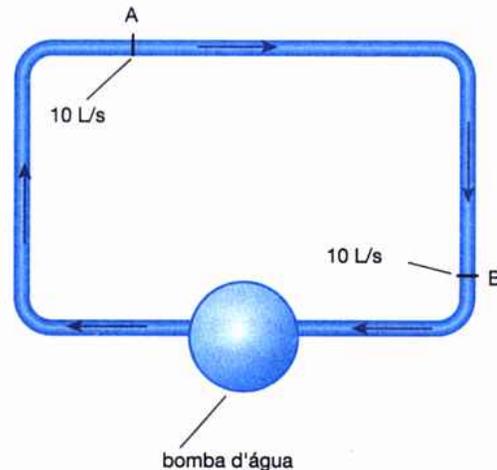


Fig. 20-12: Ilustração esquemática. A vazão da água no cano é a mesma em qualquer secção do condutor.

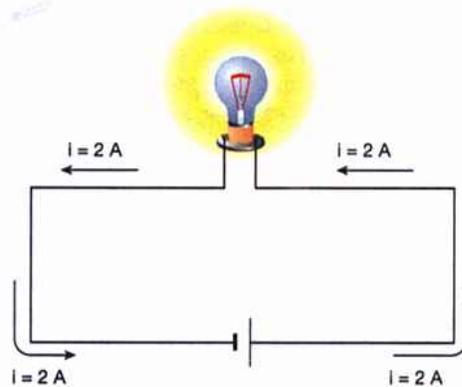
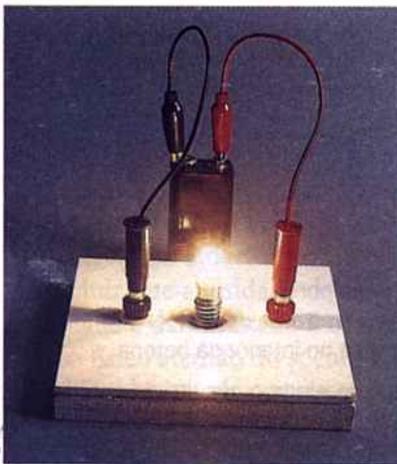


Fig. 20-13: A intensidade da corrente é a mesma em qualquer ponto do fio.

- 2) Algumas pessoas costumam dizer que um aparelho elétrico em funcionamento “consome corrente elétrica”. Baseando-nos no comentário anterior, podemos perceber que esta afirmação não está correta. De fato, se uma lâmpada, por exemplo, for ligada a uma bateria (fig. 20-13), a corrente terá um valor único em todas as secções do fio. Logo, a intensidade da corrente será a mesma, antes e depois de atravessar a lâmpada.

Portanto, a lâmpada não “consome” corrente elétrica. Na realidade, ao passar pela lâmpada, a corrente perde *energia*, que aparece sob outras formas (como estudaremos no final deste capítulo). Assim, quando uma corrente elétrica passa por um aparelho, há uma variação na energia desta corrente, mas sua intensidade não se modifica.

Exercícios de fixação

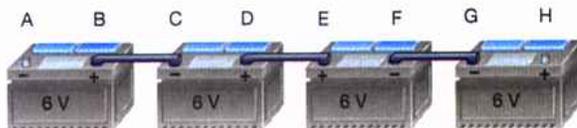
Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Um estudante possui um rádio que funciona com uma voltagem constante de 6 V.
 - Quantas pilhas secas deve o estudante associar em série para fazer funcionar o seu rádio?
 - Faça um desenho mostrando como deve ser a disposição das pilhas na associação feita pelo estudante.
- Suponha que o estudante do exercício anterior tenha associado suas pilhas secas da maneira mostrada na figura deste exercício.
 - Com esta montagem ele conseguiria obter a voltagem desejada?
 - Qual é a diferença de potencial V_{AB} entre os pontos A e B da figura?



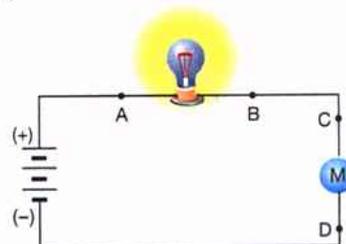
Exercício 6.

- Na associação de baterias mostrada na figura deste exercício, os pólos B e C, D e E e F e G estão ligados por chapas metálicas espessas (tudo se passa, então, como se estes pólos estivessem em contato um com o outro). Analisando a associação, responda:
 - Qual é a diferença de potencial entre B e C? E entre D e E? E entre F e G?
 - Ao passarmos de C para D, o valor do potencial aumenta ou diminui? De quanto?
 - Ao passarmos de E para F, o valor do potencial aumenta ou diminui? De quanto?



Exercício 7.

- Considerando a associação do exercício anterior, diga qual é o valor da voltagem:
 - Entre A e E.
 - Entre A e H.
- Uma lâmpada e um motor elétrico foram ligados a uma bateria, originando o circuito mostrado na figura deste exercício. Indique, na figura, o sentido da corrente no circuito e responda:
 - O sentido da corrente na lâmpada é de A para B ou de B para A?
 - O sentido da corrente no motor é de C para D ou de D para C?
 - E qual é o sentido da corrente no interior da bateria?



Exercício 9.

- Sabendo-se que, no circuito do exercício anterior, a intensidade da corrente que passa pela secção A do fio é 1,2 A, diga qual é a intensidade da corrente:
 - Que passa por B.
 - Que passa através do motor.
 - Que passa no interior da bateria.
- Considerando ainda o circuito do exercício 9, dizer se cada uma das frases seguintes está certa ou errada:
 - "O motor M está consumindo corrente elétrica."
 - "O motor M está recebendo energia da corrente elétrica."

20.3. Resistência elétrica

O QUE É RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Suponha um condutor AB ligado a uma bateria, como mostra a fig. 20-14. Sabemos que a bateria estabelece uma diferença de potencial V_{AB} nas extremidades deste condutor e, conseqüentemente, uma corrente i passará através dele.

As cargas móveis que constituem a corrente elétrica, aceleradas pela voltagem V_{AB} , realizarão colisões contra os átomos ou moléculas do condutor, havendo, então, uma oposição oferecida pelo fio à passagem da corrente elétrica através dele. Esta oposição poderá ser maior ou menor, dependendo da natureza do condutor que foi ligado entre A e B . Evidentemente, a corrente i no condutor será maior ou menor dependendo desta oposição.

Para caracterizar a oposição que um condutor oferece à passagem de corrente através dele, define-se uma grandeza, denominada *resistência elétrica*, R , do condutor, da seguinte maneira:

$$R = \frac{V_{AB}}{i}$$

Vemos, portanto, que, para um dado valor de V_{AB} , quanto menor for o valor da corrente i , maior será o valor de R , isto é, maior será a oposição que o condutor oferece à passagem de corrente através dele.

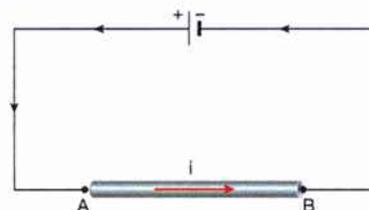


Fig. 20-14: Ilustração esquemática. A intensidade da corrente que passa em um condutor, nos extremos do qual é estabelecida uma voltagem V_{AB} , depende da resistência deste condutor.

Georg Simon Ohm (1787-1854)

Nascido na Bavária, o físico alemão Ohm iniciou sua carreira científica como professor de Matemática no Colégio dos Jesuítas, em Colônia. Em 1827 publicou o resultado de seu trabalho mais importante em um folheto: "O circuito galvânico examinado matematicamente". Nesta publicação ele apresentava a lei sobre a resistência dos condutores, que mais tarde foi denominada lei de Ohm. Embora estes estudos tenham sido uma colaboração importante na teoria dos circuitos elétricos e suas aplicações, na época eles foram recebidos com frieza pela comunidade científica. Este fato levou Ohm a se demitir do cargo que ocupava em Colônia. Em 1833, entretanto, ele se reintegrou nas atividades científicas aceitando um cargo na Escola Politécnica de Nuremberg. Seu trabalho foi finalmente reconhecido, tendo, então, recebido uma medalha da Real Sociedade de Londres.



SPL/Stock Photos

Observando a definição de resistência que acabamos de apresentar, podemos concluir que a unidade desta grandeza, no S.I., será 1 volt/ampère = 1 V/A. Esta unidade é denominada 1 ohm (representa-se pela letra grega Ω), em homenagem ao físico alemão do século XIX, Georg Ohm, que colaborou no estudo de fenômenos relacionados com a corrente elétrica. Logo, temos

$$1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \text{ ohm} = 1 \Omega$$

Em resumo, podemos destacar:

quando uma voltagem V_{AB} é aplicada nas extremidades de um condutor, estabelecendo nele uma corrente elétrica i , a resistência deste condutor é dada pela relação

$$R = \frac{V_{AB}}{i}$$

Quanto maior for o valor de R , maior será a oposição que o condutor oferecerá à passagem da corrente.

Exemplo

Ligando-se uma lâmpada à tomada de uma residência, uma voltagem de 120 V será aplicada às extremidades do filamento da lâmpada. Verifica-se, então, que uma corrente de 2,0 A passa pelo filamento.

a) Qual é o valor da resistência deste filamento?

O valor de R será dado por $R = V_{AB}/i$, onde temos $V_{AB} = 120$ V e $i = 2,0$ A. Assim:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{120}{2,0} \quad \text{donde} \quad R = 60 \, \Omega$$

b) Se esta lâmpada for ligada aos pólos de uma bateria que aplica, no filamento, uma voltagem de 12 V, qual será a corrente que passará através dele (suponha que a resistência do filamento permaneça constante)?

Da relação $R = V_{AB}/i$, obtemos

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{12}{60} \quad \text{donde} \quad i = 0,20 \text{ A}$$

c) Quando a lâmpada é ligada a uma outra bateria, verifica-se que uma corrente de 1,5 A passa pelo filamento. Qual é a voltagem que esta bateria está aplicando à lâmpada?

De $R = V_{AB}/i$, tiramos

$$V_{AB} = Ri = 60 \times 1,5 \quad \text{donde} \quad V_{AB} = 90 \text{ V}$$

COMENTÁRIOS



Fig. 20-15: Uma resistência é representada, em diagramas de circuitos elétricos, da maneira mostrada na figura.

1) Quando um condutor apresenta uma resistência elétrica, ele é denominado um *resistor*, sendo, entretanto, comum usar-se o termo “resistência” como sinônimo de “resistor”. Nos diagramas de circuitos elétricos, um resistor é representado por uma linha “quebrada”, como mostra a fig. 20-15.

2) Se um trecho de um circuito possuir uma resistência elétrica muito pequena (desprezível), este trecho será representado, nos diagramas, por linhas cheias (não-quebradas), como os trechos AB e CD da fig. 20-16. Nesta figura, as resistências R_{AB} e R_{CD} dos fios que ligam as extremidades da resistência R à bateria são desprezíveis. Então, podemos considerar $R_{AB} = 0$ e $R_{CD} = 0$. Deve-se observar que a resistência R ligada entre B e C tem um valor apreciável, que não pode ser desprezado.

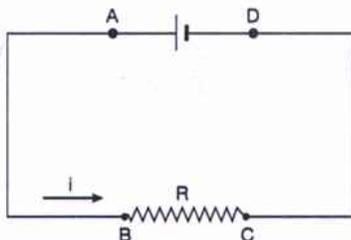


Fig. 20-16: Os fios de ligação cuja resistência é desprezível são representados por linhas retas.

3) Na fig. 20-16, designemos por i a corrente que está passando no circuito. Lembrando-se da definição de resistência elétrica, podemos escrever, para o trecho AB do circuito, a seguinte relação:

$$V_{AB} = R_{AB}i \quad \text{ou} \quad V_A - V_B = R_{AB}i$$

Como vimos que $R_{AB} = 0$, teremos $V_A - V_B = 0$ ou $V_A = V_B$. Logo, dois pontos situados sobre um trecho de resistência desprezível possuem o mesmo potencial.

É claro que, ao passarmos de B para C , haverá uma queda no potencial, pois a resistência R do trecho BC não é desprezível. A diferença de potencial entre B e C será dada por

$$V_B - V_C = Ri$$

Logo, teremos $V_B > V_C$, isto é, o potencial decresce ao longo da resistência, desde o valor V_B até o valor V_C .

Do mesmo modo que no trecho AB , no trecho CD não haverá variação no potencial porque $R_{CD} = 0$. Então, teremos $V_C = V_D$.

Baseando-nos nesta análise que acabamos de fazer, é fácil concluir que o gráfico da variação do potencial V , ao longo do circuito, desde A até D , terá o aspecto mostrado na fig. 20-17.

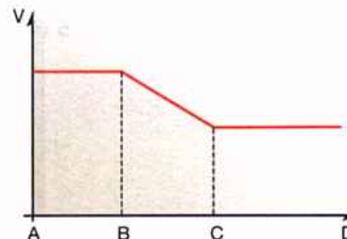


Fig. 20-17: Gráfico de variação do potencial ao longo do circuito mostrado na fig. 20-16.

Fatores que influenciam no valor de uma resistência

Para analisar os fatores que influem no valor da resistência de um fio metálico, consideremos a montagem mostrada na figura I: três fios, de mesmo comprimento, são fixados sobre um suporte de madeira, sendo M_1N_1 e M_2N_2 feitos de um mesmo material (uma liga de níquel e cromo) e M_3N_3 de cobre. Além disso, a área da secção reta de M_1N_1 é maior que as áreas de M_2N_2 e de M_3N_3 , que são iguais entre si (isto é, M_1N_1 é mais grosso que os outros dois). Façamos a seguinte experiência:

1) Ligando-se uma pilha e um amperímetro A ao fio M_1N_1 (fig. I), apenas a resistência do trecho M_1P será percorrida pela corrente fornecida pela pilha e indicada pelo amperímetro. Se deslocarmos o contato móvel P ao longo de M_1N_1 , aproximando-o de N_1 , observaremos que a leitura do amperímetro vai tornar-se cada vez menor. Como a voltagem da pilha é sempre a mesma, concluímos que a resistência do trecho M_1P **aumenta** à medida que aumentamos seu comprimento. Essa experiência nos mostra uma propriedade válida para qualquer condutor:

A resistência de um condutor é tanto maior quanto maior for seu comprimento.

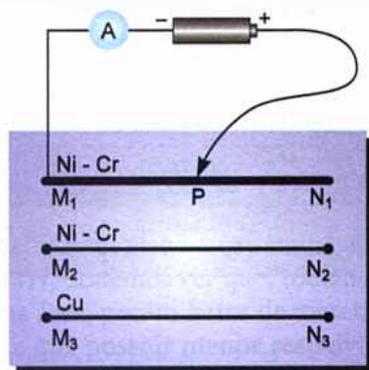


Fig. I: Esquema de montagem que nos permite identificar os fatores que influenciam na resistência elétrica de um condutor.

2) Suponha, agora, que a pilha e o amperímetro sejam ligados às extremidades M_1 e N_1 e que anotemos a indicação do amperímetro. Se, em seguida, essa ligação fosse feita em M_2 e N_2 , isto é, nas extremidades do fio mais fino de níquel-cromo, observaríamos uma diminuição na leitura ao amperímetro. Portanto, a resistência de M_2N_2 é **maior** que a de M_1N_1 . Lembrando que esses dois fios têm o mesmo comprimento, vemos que

eles diferem apenas pela área de sua secção reta e chegamos à seguinte propriedade, válida para os condutores em geral:

A resistência de um condutor é tanto maior quanto menor for a área de sua secção reta, isto é, quanto mais fino for o condutor.

- 3) Ligando, finalmente, o amperímetro e a pilha às extremidades do fio de cobre M_3N_3 , vemos que a indicação do amperímetro é maior que a da ligação feita em M_2N_2 , isto é, a resistência do fio M_3N_3 é **menor** que a de M_2N_2 . Como esses fios têm o mesmo comprimento e a mesma área da secção reta, concluímos que:

A resistência de um condutor depende do material de que ele é feito.

Portanto, alguns materiais são melhores condutores que outros. Por exemplo: da experiência que acabamos de descrever, concluímos que o cobre é melhor condutor que o níquel-cromo. Na tabela, mostramos alguns metais, colocados em ordem do melhor condutor (prata) para o pior (níquel-cromo).

Prata
Cobre
Alumínio
Tungstênio
Ferro
Chumbo
Mercúrio
Níquel-cromo

Não deixe de realizar a nona experiência apresentada no final deste capítulo.

RESISTIVIDADE DE UM MATERIAL

A experiência nos mostra que se tomarmos um fio condutor, como o da fig. 20-18, o valor de sua resistência dependerá de seu comprimento e da área de sua secção reta.

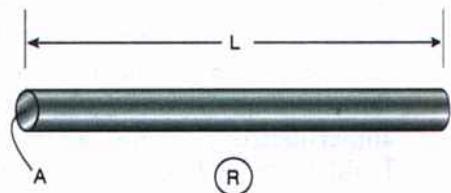


Fig. 20-18: A resistência de um condutor é dada por $R = \rho L/A$, onde ρ é a resistividade do material.

Realizando-se medidas cuidadosas, verifica-se que a resistência, R , do fio é diretamente proporcional ao seu comprimento L , isto é,

$$R \propto L$$

Por outro lado, verifica-se que a resistência do fio é inversamente proporcional à área, A , de sua seção reta, ou seja

$$R \propto \frac{1}{A}$$

Portanto, quanto mais grosso for o fio, menor será a sua resistência. Associando-se estes dois resultados, podemos escrever que

$$R \propto \frac{L}{A}$$

Vemos que, se quisermos obter um fio condutor de baixa resistência, ele deve ser de pequeno comprimento e possuir grande área de seção reta (fio grosso). Introduzindo uma constante de proporcionalidade apropriada, podemos transformar a relação anterior em uma igualdade. Esta constante, que se representa pela letra grega ρ , é denominada *resistividade*. Virá, então

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

A resistividade é uma grandeza característica do material que constitui o fio, isto é, cada substância possui um valor diferente para a resistividade ρ . Na tabela 20-1 são apresentados os valores das resistividades de algumas substâncias.

Resistividade à temperatura ambiente	
Material	ρ (ohm - metro)
Alumínio	$2,6 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$
Níquel-cromo	100×10^{-8}
Chumbo	22×10^{-8}
Ferro	10×10^{-8}
Merúrio	94×10^{-8}
Prata	$1,5 \times 10^{-8}$
Tungstênio	$5,5 \times 10^{-8}$

Tabela 20-1.

Pela relação $R = \rho L/A$, podemos ver que, tomando-se vários fios de mesmo comprimento e de mesma área, porém feitos de materiais diferentes, apresentará menor resistência aquele que possuir menor resistividade. Concluímos, então, que, quanto menor for a resistividade ρ de um material, menor será a oposição que este material oferecerá à passagem de corrente através dele. Assim,

uma substância será tanto melhor condutora de eletricidade quanto menor for o valor de sua resistividade.

Observando a tabela 20-1, vemos que todas as substâncias ali apresentadas são boas condutoras de eletricidade, pois possuem resistividades muito pequenas. Esta constatação poderia ser prevista, pois as substâncias apresentadas na tabela são metálicas e, como sabemos, os metais são bons condutores de eletricidade.

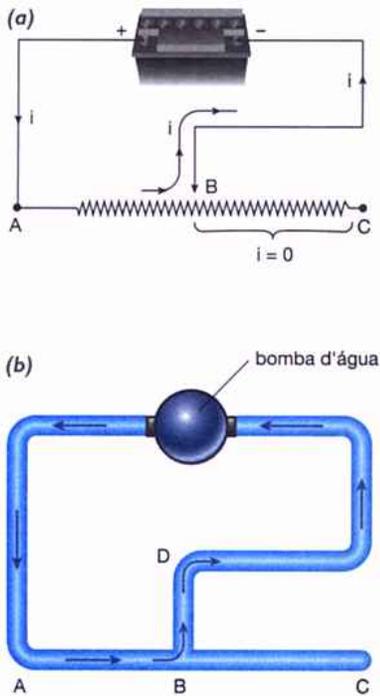


Fig. 20-19: A circulação da água apresentada em (b) é semelhante ao circuito elétrico mostrado em (a).

O QUE É UM REOSTATO

A dependência da resistência de um fio com o seu comprimento encontra uma aplicação importante na construção de um aparelho denominado *reostato*. Com o reostato é possível aumentar ou diminuir, conforme se desejar, a intensidade da corrente em um circuito.

Na fig. 20-19-a apresentamos um tipo muito comum de reostato, constituído por um comprido fio AC , de resistência apreciável, e um cursor B , que pode ser deslocado ao longo deste fio, estabelecendo contato em qualquer ponto entre A e C . Observe que a corrente que sai do pólo positivo da bateria percorre o trecho AB do reostato, prosseguindo através do cursor até o pólo negativo da bateria. Não há corrente passando no trecho BC , pois estando o circuito interrompido em C , a corrente não poderá prosseguir através deste trecho.

Para ajudá-lo a entender este fato, apresentamos uma canalização (fig. 20-19-b) na qual temos uma circulação de água semelhante ao circuito elétrico da fig. 20-19-a. O fluxo de água, impelido pela bomba, percorre o trecho AB e desvia-se totalmente para o cano BD . Como a extremidade C está fechada, não é possível haver circulação de água no trecho BC .

Voltando à fig. 20-19-a, vemos claramente que, deslocando-se o cursor B para A ou para C , estaremos variando o valor da resistência introduzida no circuito. Esta resistência poderá variar desde $R = 0$ (cursor B em A) até o valor máximo da resistência do reostato (cursor B em C).

A fig. 20-20-a é uma fotografia de um reostato de cursor muito usado nos laboratórios de eletricidade e a fig. 20-20-b mostra como se representa um reostato nos diagramas de circuitos elétricos.

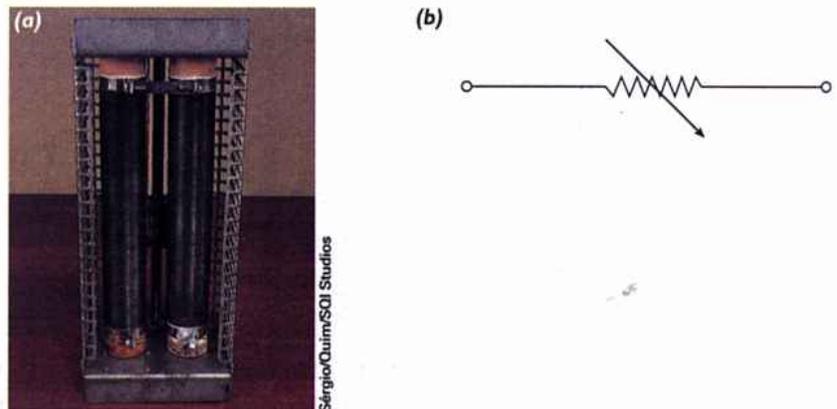
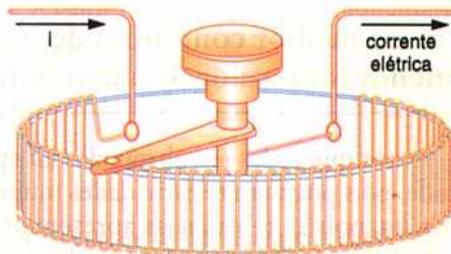


Fig. 20-20: Fotografia de um reostato de cursor (a) e maneira pela qual se representa um reostato em um diagrama de circuito elétrico (b).

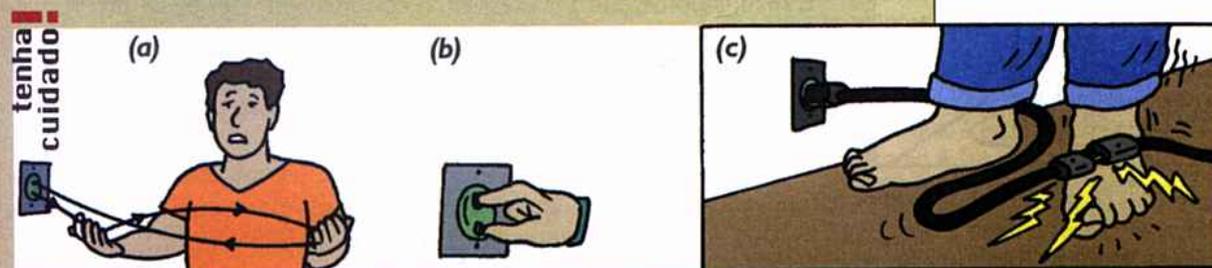
Esquema e fotografia de um reostato muito usado em circuitos elétricos. Ao girar o volante do dispositivo, o cursor se desloca ao longo de um fio condutor, variando seu comprimento e, assim, fazendo variar a resistência do circuito.



Choque elétrico e suas conseqüências

O choque elétrico, como provavelmente é de seu conhecimento, é causado por uma corrente elétrica que passa através do corpo humano ou de um animal qualquer.

Vários efeitos do choque podem ser observados dependendo de alguns fatores como, por exemplo, a região do corpo que é atravessada pela corrente. Na fig. 1, a situação (a), na qual a corrente passa pelo coração da pessoa, pode corresponder a uma situação de grande risco, enquanto a situação (b), na qual a corrente passa apenas pela mão, é menos perigosa, embora possam ocorrer queimaduras locais.



A intensidade da corrente é, entretanto, o fator mais relevante nas sensações e conseqüências do choque elétrico. Estudos cuidadosos deste fenômeno permitiram chegar aos seguintes valores aproximados:

- uma corrente de 1 mA a 10 mA* provoca apenas uma sensação de formigamento;
- correntes de 10 mA a 20 mA já causam sensações dolorosas;
- correntes superiores a 20 mA e inferiores a 100 mA causam, em geral, grandes dificuldades respiratórias;
- correntes superiores a 100 mA são extremamente perigosas, podendo causar a morte da pessoa, por provocar contrações rápidas e irregulares do coração (este fenômeno é denominado *fibrilação cardíaca*);
- correntes superiores a 200 mA não causam fibrilação, porém dão origem a graves queimaduras e conduzem à parada cardíaca.

Por outro lado, a voltagem não é determinante neste fenômeno. Por exemplo, em situações de eletricidade estática (pente eletrizado, gerador de Van de Graaff usado em laboratórios de ensino etc.), embora ocorram voltagens muito elevadas, as cargas elétricas envolvidas são, em geral, muito pequenas e os choques produzidos não apresentam, normalmente, nenhum risco.

Entretanto, voltagens relativamente pequenas podem causar graves danos, dependendo da resistência do corpo humano. O valor desta resistência pode variar entre, aproximadamente, 100 000 Ω , para a pele seca, e cerca de 1 000 Ω , para a pele molhada. Assim, se uma pessoa com a pele seca tocar os dois pólos de uma tomada de 120 V, seu corpo será atravessado por uma corrente

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{120}{100\,000} \quad \text{ou} \quad i = 1,2 \text{ mA}$$

Fig. 1: Em (a), a corrente elétrica passa através do coração da pessoa. Em (b), a passagem se faz apenas pela região da mão situada entre os dois dedos. Em (c), a corrente passa apenas pelo pé da pessoa e os danos são mais leves.

*Como você pode perceber facilmente, 1 mA = 1 miliampère = 10^{-3} A.



Fig. II: Uma tensão de 120 V pode causar choques fatais se você estiver com a pele molhada.

tenha cuidado!

Esta pessoa, como vimos, sentirá apenas um ligeiro formigamento. Se a pessoa estivesse, porém, com a pele molhada, a corrente em seu corpo seria

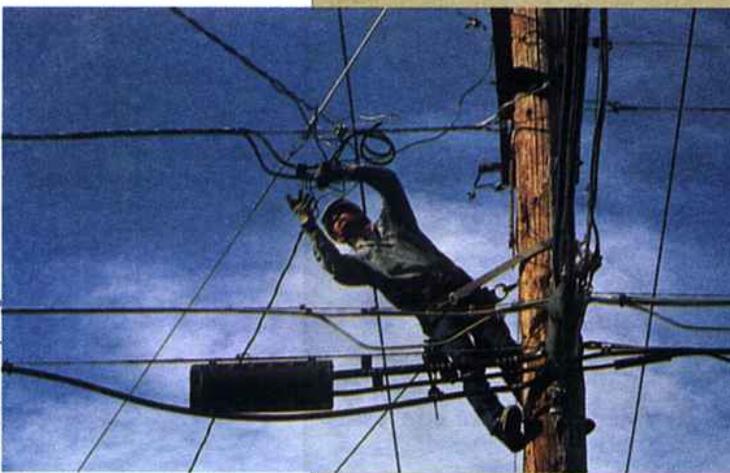
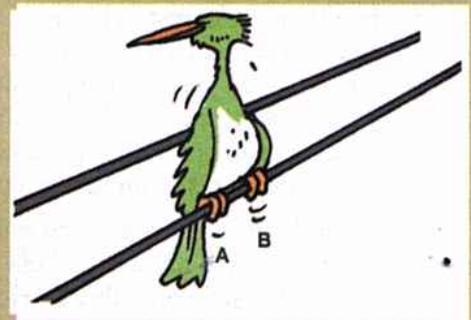
$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{120}{1000} \quad \text{ou} \quad i = 120 \text{ mA}$$

Portanto, esta pessoa poderia, até mesmo, vir a falecer em virtude de fibrilação cardíaca. Por este motivo, não devemos tocar em instalações elétricas se estivermos com a pele molhada (fig. II).

Em casos de tensões muito elevadas, como ocorre nos cabos de transmissão de energia elétrica, o contato com eles é sempre perigoso. Por maior que seja a resistência de uma pessoa (mesmo com a pele seca e contatos através de isolantes), uma voltagem de 13 600 V, encontrada nos cabos de alta tensão das ruas das cidades, poderá dar origem a uma corrente fatal.

Por isso mesmo, muitas pessoas ficam intrigadas ao verem um pássaro pousado em um fio de alta tensão, sem ser eletrocutado. Este fato é possível porque ele toca apenas um fio, em dois pontos muito próximos, como os pontos A e B mostrados na fig. III. A diferença de potencial V_{AB} entre estes pontos é, evidentemente, muito pequena, em virtude da resistência desprezível do trecho AB do cabo. Assim, a corrente que atravessa o corpo do pássaro (que possui resistência bem maior do que o trecho AB) é imperceptível. Entretanto, se o pássaro, por infelicidade, abrir as asas e tocar simultaneamente os dois fios de alta tensão (ou fizer o contato de um deles com a terra), ele será submetido a uma tensão $V_{CD} = 13\,600 \text{ V}$ (fig. V) e receberá um choque violentíssimo, que causará sua morte imediata.

Fig. III: O contato com fios de alta tensão em apenas um ou dois pontos próximos (sem ligação com a terra) não causa nenhum dano.



Richard Shock/Getty Images

Fig. IV: O técnico da companhia de eletricidade não sofrerá dano se tocar apenas num desses cabos da linha de alta voltagem (estando isolado da Terra).

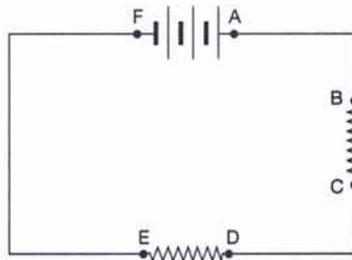


Fig. V: O pássaro da figura é violentamente eletrocutado.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

12. Quando uma dada lâmpada é ligada a uma bateria que lhe aplica uma voltagem $V_{AB} = 6,0$ V, verifica-se que o filamento desta lâmpada é percorrido por uma corrente $i = 2,0$ A.
- Qual é a resistência, R , deste filamento?
 - Se esta lâmpada for ligada a uma pilha, que lhe aplica uma voltagem de 1,5 V, qual será a corrente que passará em seu filamento (suponha que a resistência do filamento não se modifique)?
 - Quando esta lâmpada é ligada a uma certa bateria, uma corrente de 1,5 A passa por seu filamento. Qual é a voltagem que esta bateria aplica na lâmpada?
13. Observe o circuito mostrado na figura deste exercício. Lembrando-se da convenção para representar resistências elétricas, responda:
- Quais os trechos do circuito que têm resistências desprezíveis?
 - Quais os trechos cujas resistências não podem ser desprezadas?
 - Quais os valores das voltagens V_{AB} , V_{CD} e V_{EF} ?



Exercício 13.

14. No circuito do exercício anterior, suponha que a corrente que passa pela seção A seja de 0,30 A e que as resistências de BC e DE sejam $R_{BC} = 15 \Omega$ e $R_{DE} = 25 \Omega$.
- Qual é a intensidade da corrente que passa na resistência BC? E na resistência DE?
 - Determine os valores das voltagens V_{BC} e V_{DE} .
 - Quais os valores das diferenças de potencial V_{AD} e V_{AF} ?
15. Uma bateria mantém uma voltagem constante em um fio de cobre no qual é estabelecida uma corrente de 2,0 A. Este fio é substituído por outro, também de cobre, de mesmo comprimento mas de diâmetro duas vezes maior que o primeiro.
- A resistência do segundo fio é maior ou menor do que a do primeiro? Quantas vezes?
 - Qual a intensidade da corrente que passará no segundo fio?
16. Consultando a tabela 20-1, responda:
- Considerando o cobre e o tungstênio, qual deles é melhor condutor de eletricidade?
 - Suponha que o único critério para a escolha do material a ser usado na confecção dos fios de ligação fosse o fato de ele ser bom condutor. Neste caso, qual seria o material da fiação elétrica de nossas residências?
17. A bateria da fig. 20-19-a estabelece entre os pontos A e B uma voltagem constante $V_{AB} = 12$ V. Suponha que o resistor AC do reostato seja constituído por um fio uniforme, cuja resistência total é $R_{AC} = 100 \Omega$. Determine a intensidade da corrente no circuito para as seguintes posições do cursor B:
- No ponto médio do fio AC.
 - Na extremidade C do resistor.

20.4. A lei de Ohm

O QUE É UM CONDUTOR ÔHMICO

Consideremos um condutor, como o da fig. 20-14, ao qual foi aplicada uma certa voltagem V_{AB} . Como sabemos, esta voltagem estabelecerá, no condutor, uma corrente i . Variando o valor da voltagem aplicada ao condutor, verificamos que a corrente que passa por ele também se modifica. Por exemplo:

- uma voltagem $(V_{AB})_1$ provoca uma corrente i_1 ;
- uma voltagem $(V_{AB})_2$ provoca uma corrente i_2 ;
- uma voltagem $(V_{AB})_3$ provoca uma corrente i_3 , etc.

O cientista alemão Georg Ohm realizou várias experiências, medindo estas voltagens (e as correntes correspondentes) quando aplicadas em diversos condutores feitos de substâncias diferentes. Verificou então que, para muitos materiais, principalmente os metais, a relação entre a voltagem e a corrente mantinha-se constante, isto é,

$$\frac{(V_{AB})_1}{i_1} = \frac{(V_{AB})_2}{i_2} = \frac{(V_{AB})_3}{i_3} = \dots$$

ou seja,

$$\frac{V_{AB}}{i} = \text{constante}$$

Mas V_{AB}/i representa o valor da resistência R do condutor. Então, Ohm concluiu que para aqueles condutores tinha-se $R = \text{constante}$.

Este resultado é conhecido como *lei de Ohm*, podendo ser sintetizado da seguinte maneira:

para um grande número de condutores (principalmente os metais), o valor da resistência permanece constante, não dependendo da voltagem aplicada ao condutor.

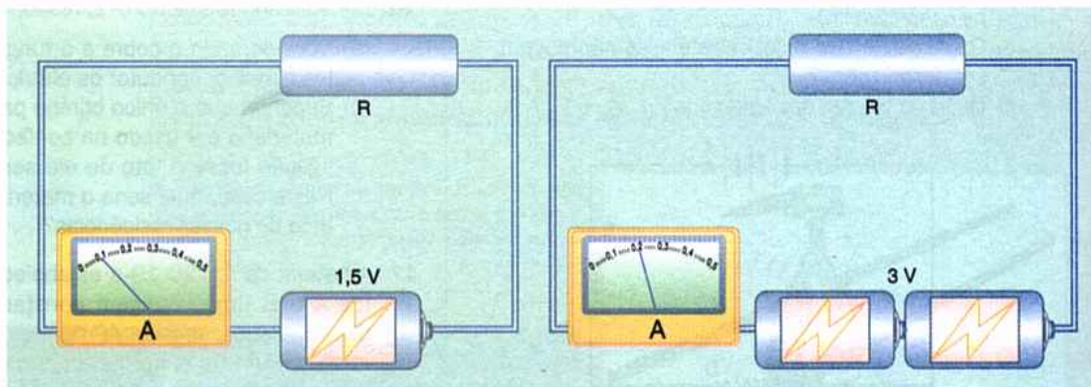


Ilustração esquemática. A resistência R obedece à lei de Ohm. Verifique este fato calculando o valor de R nas duas situações apresentadas.

COMENTÁRIOS

- 1) Os condutores que obedecem a esta lei são denominados *condutores ôhmicos*. Não devemos nos esquecer, porém, de que existem materiais que não obedecem à lei de Ohm, isto é, modificando-se a voltagem que é aplicada a um dado condutor, feito com material deste tipo, modifica-se o valor da resistência deste condutor (a resistividade do material é alterada pela modificação na voltagem).
- 2) É claro que a expressão $V_{AB} = Ri$ é válida, quer o condutor obedeça ou não à lei de Ohm. Naturalmente, se o condutor for ôhmico, o valor de R nesta expressão será sempre o mesmo, enquanto para um condutor não ôhmico, o valor de R variará conforme a voltagem V_{AB} aplicada. Em nosso curso, salvo se for dito o contrário, estaremos lidando apenas com condutores que obedecem à lei de Ohm.

O GRÁFICO $V_{AB} \times i$

Para os condutores ôhmicos, a expressão $V_{AB} = Ri$ nos mostra que $V_{AB} \propto i$, pois o valor de R permanece constante. Portanto, se construirmos o gráfico $V_{AB} \times i$ para um condutor ôhmico, obteremos uma reta passando pela origem (fig. 20-21-a). É fácil perceber que a inclinação deste gráfico nos fornece o valor da resistência R do condutor.

Se o condutor não obedecer à lei de Ohm, o gráfico $V_{AB} \times i$ não será retilíneo, podendo apresentar diversos aspectos, dependendo da natureza do condutor. Na fig. 20-21-b apresentamos duas formas possíveis do gráfico $V_{AB} \times i$ para dois condutores, (1) e (2), que não obedecem à lei de Ohm.

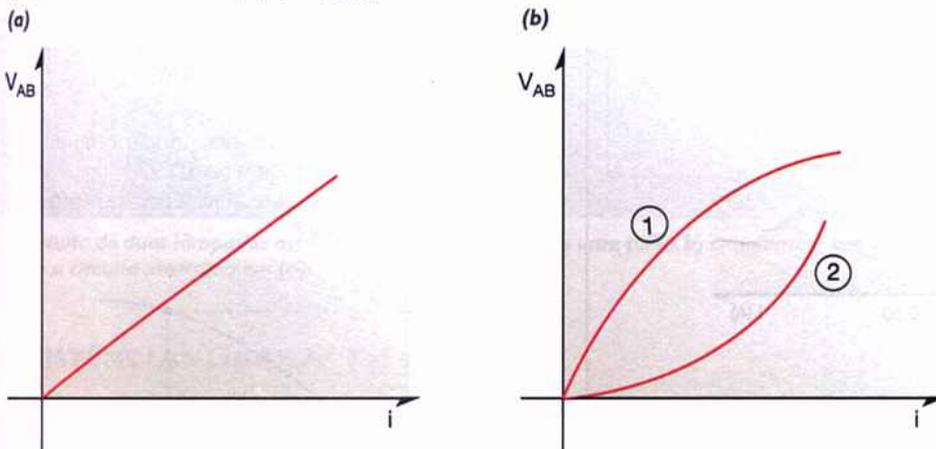


Fig. 20-21: Gráfico $V_{AB} \times i$ para um condutor ôhmico (a) e para condutores não-ôhmicos (b).

Exemplo

Em um laboratório, um fio condutor foi submetido a diversas tensões. Medindo-se os valores destas tensões e da corrente que cada uma delas estabeleceu no condutor, obteve-se a tabela seguinte:

V_{AB} (V)	5,0	10	15	20
I (A)	0,20	0,40	0,60	0,80

a) Construir o gráfico $V_{AB} \times i$ para este condutor.

Usando os dados da tabela, obtivemos o gráfico mostrado na fig. 20-22.

b) Este condutor obedece à lei de Ohm?

Sim, pois o gráfico $V_{AB} \times i$ é uma reta passando pela origem e, portanto, $V_{AB} \propto i$. Isto poderia ser constatado, também, pelos valores da tabela, pois vemos aí que, dobrando V_{AB} , o valor de i também dobra etc. Logo, a resistência R do fio é constante e, então, ele é um condutor ôhmico.

c) Qual é o valor da resistência R deste condutor?

O valor de R poderá ser obtido pela inclinação do gráfico $V_{AB} \times i$. Considerando os pontos M e N da fig. 20-22 temos:

$$\Delta V = 10 \text{ V} \quad \text{e} \quad \Delta i = 0,40 \text{ A}$$

Logo, a inclinação do gráfico é

$$\frac{\Delta V}{\Delta i} = \frac{10}{0,40} = 25$$

Então, o valor da resistência do fio é $R = 25 \Omega$. Deve-se observar que o valor de R poderia ser obtido também a partir da tabela fornecida, dividindo qualquer valor de V_{AB} pelo correspondente valor de i , isto é,

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{5,0}{0,20} = \frac{10}{0,40} = \frac{15}{0,60} = \frac{20}{0,80} \quad \text{ou} \quad R = 25 \Omega$$

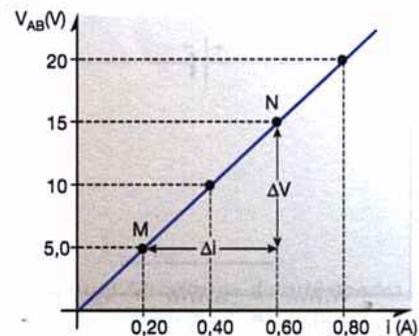


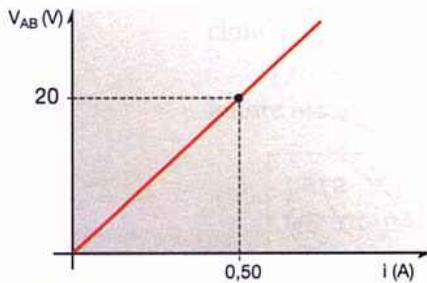
Fig. 20-22: Gráfico para o exemplo da seção 20.4.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

18. A figura deste exercício mostra o gráfico $V_{AB} \times i$ para um certo resistor.

- Este resistor é ôhmico?
- Qual é o valor de sua resistência quando submetido a uma voltagem de 20 V?



Exercício 18.

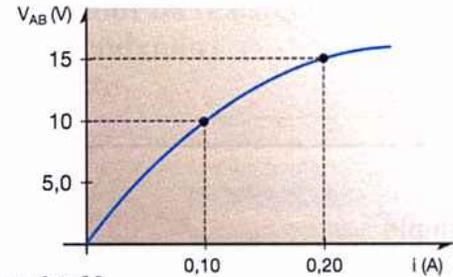
19. Considerando o resistor do exercício anterior, responda:

- Duplicando-se a voltagem nele aplicada, o que ocorre com o valor da corrente que passa no resistor?

- Duplicando-se a voltagem nele aplicada, o que ocorre com o valor de sua resistência?
- Qual a voltagem que deve ser aplicada no resistor para que ele seja percorrido por uma corrente de 2,0 A?

20. Para um certo resistor, obtivemos o gráfico $V_{AB} \times i$ mostrado na figura deste exercício.

- Este resistor é ôhmico?
- Qual é o valor de sua resistência quando submetido a uma voltagem de 10 V?
- E qual é o valor de sua resistência quando a voltagem é de 15 V?



Exercício 20.

20.5. Associação de resistências

RESISTÊNCIAS LIGADAS EM SÉRIE

Muitas vezes, nos circuitos elétricos, aparecem resistências ligadas uma em seguida à outra, como mostra a fig. 20-23.

Quando isto acontece, dizemos que as resistências estão *associadas em série*. As lâmpadas usadas na decoração das árvores de Natal, por exemplo, geralmente são associadas desta maneira (fig. 20-24).

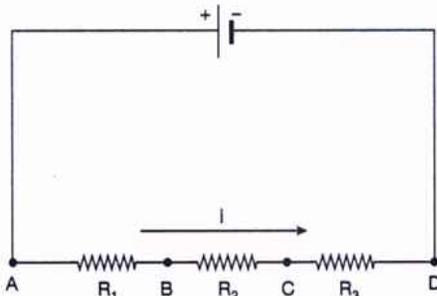


Fig. 20-23: Esquema de resistências associadas em série.

Se uma diferença de potencial for aplicada às extremidades A e D da associação apresentada na fig. 20-23, uma corrente elétrica passará pelas resistências desta associação. Como já sabemos, a intensidade i desta corrente terá o mesmo valor em qualquer seção do circuito e, portanto, as resistências R_1 , R_2 e R_3 serão percorridas pela mesma corrente (isto é verdade mesmo que R_1 , R_2 e R_3 tenham valores diferentes).

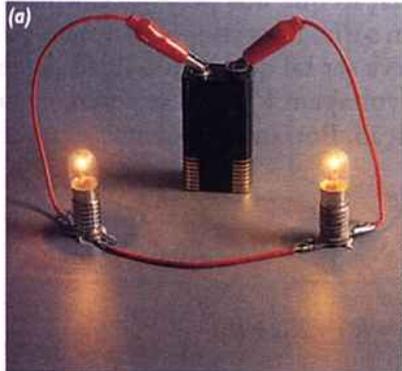
Designando por V_{AB} , V_{BC} e V_{CD} as voltagens em R_1 , R_2 e R_3 , respectivamente, é fácil perceber, pela fig. 20-23, que temos

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = V_{AD}$$

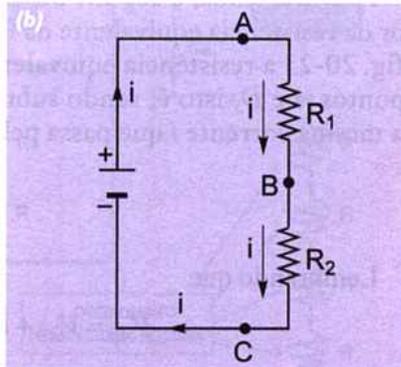
Como o valor de i é igual nas três resistências, podemos escrever:

$$V_{AB} = R_1 i \quad V_{BC} = R_2 i \quad V_{CD} = R_3 i$$

Podemos concluir facilmente que na resistência de maior valor será observada a maior queda de potencial.



Agostinho de Paula



a) Circuito de duas lâmpadas associadas em série e ligadas a uma pilha. b) Diagrama representando o circuito mostrado em (a).



Fig. 20-24: Na iluminação de uma árvore de Natal, geralmente as lâmpadas estão associadas em série.

RESISTÊNCIAS LIGADAS EM PARALELO

As resistências elétricas podem também ser ligadas, em um circuito, da maneira mostrada na fig. 20-25. Neste tipo de ligação, dizemos que as resistências estão *associadas em paralelo*. Os dois faróis de um automóvel e as lâmpadas de uma residência são exemplos de resistências ligadas em paralelo.

Vemos, pela fig. 20-25, que as resistências R_1 , R_2 e R_3 estão ligadas, cada uma, entre os mesmos pontos A e B . Desta maneira, a mesma diferença de potencial V_{AB} estará aplicada em cada uma dessas resistências. Por exemplo, se a voltagem V_{AB} fornecida pela bateria da fig. 20-25 for de 12 V, teremos tanto R_1 quanto R_2 e R_3 submetidas, cada uma, a esta voltagem. Observe que a corrente total i , fornecida pela bateria, se distribui pelas resistências, passando uma corrente i_1 em R_1 , i_2 em R_2 e i_3 em R_3 . É claro que $i_1 + i_2 + i_3 = i$ e, além disso (lembrando-se da relação $i = V_{AB}/R$), teremos

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

Por estas relações vemos facilmente que a resistência de menor valor será percorrida pela corrente de maior intensidade.

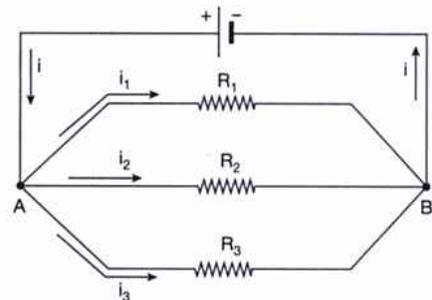
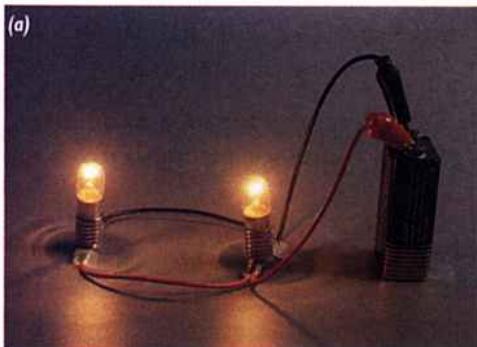
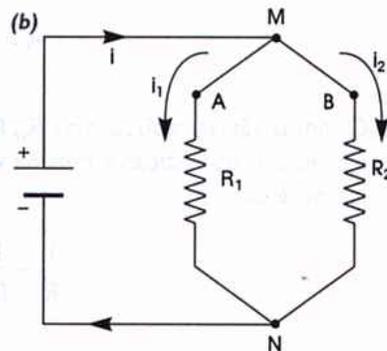


Fig. 20-25: Resistências associadas em paralelo.



Agostinho de Paula



a) Circuito de duas lâmpadas associadas em paralelo e ligadas a uma pilha. b) Diagrama representando o circuito mostrado na figura (a).

RESISTÊNCIA EQUIVALENTE

Tanto na fig. 20-23 como na fig. 20-25, verifica-se que é possível trocar o conjunto das resistências R_1 , R_2 e R_3 por uma resistência única, R , capaz de substituir a associação. Esta resistência é denominada *resistência equivalente* da associação.

Procuraremos, a seguir, obter uma relação que nos permita calcular o valor da resistência equivalente da ligação em série. Para isso, observemos que na fig. 20-23 a resistência equivalente, R , deve ser tal que, sendo ligada entre os pontos A e D , isto é, sendo submetida à voltagem V_{AD} , ela seja percorrida pela mesma corrente i que passa pela associação. Portanto, podemos escrever:

$$R = \frac{V_{AD}}{i}$$

Lembrando que

$$V_{AD} = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = R_1 i + R_2 i + R_3 i$$

vem

$$R = \frac{R_1 i + R_2 i + R_3 i}{i} \quad \text{donde} \quad \boxed{R = R_1 + R_2 + R_3}$$

Assim, concluímos que a resistência equivalente a um conjunto de resistências ligadas em série é dada pela soma das resistências que constituem a associação.

Podemos mostrar, com um procedimento semelhante, que, para um conjunto de resistências ligadas em paralelo (fig. 20-25), a resistência equivalente, R , é dada pela expressão

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

isto é, o inverso da resistência equivalente é igual à soma dos inversos das resistências associadas.

Em resumo:

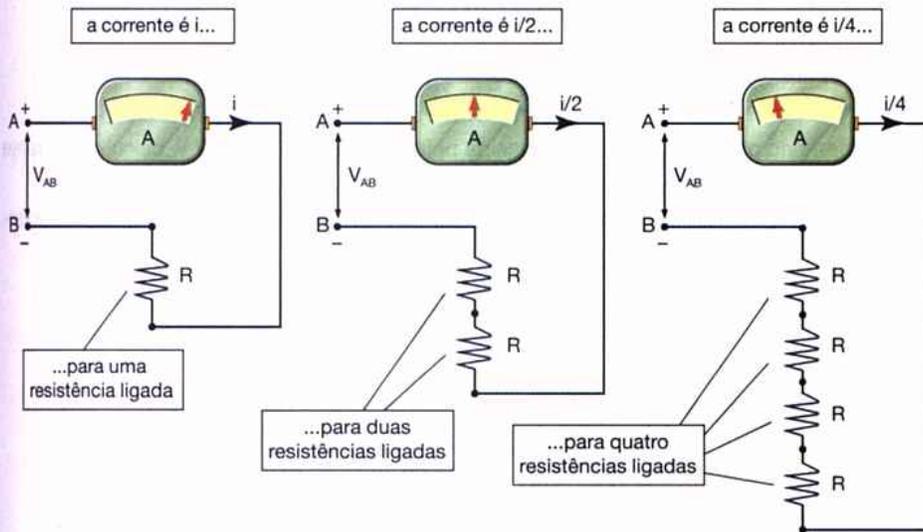
1. Quando várias resistências R_1 , R_2 , R_3 etc. são associadas em série, todas elas são percorridas pela mesma corrente, e a resistência equivalente da associação é dada por

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

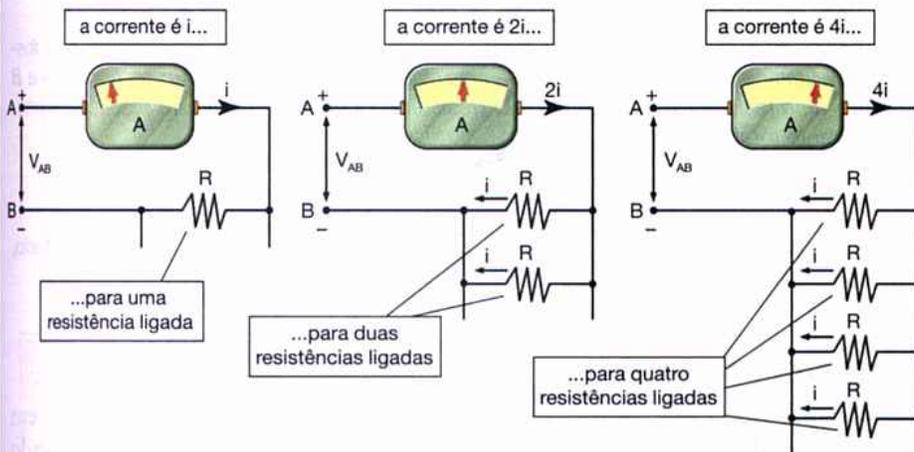
2. Quando várias resistências R_1 , R_2 , R_3 , etc. são associadas em paralelo, todas elas ficam submetidas à mesma voltagem, e a resistência equivalente da associação é dada por

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

RESISTÊNCIAS EM SÉRIE



RESISTÊNCIAS EM PARALELO



Ilustrações esquemáticas. Em um circuito elétrico submetido a uma diferença de potencial V_{AB} , teremos: quanto maior o número de resistências em série, maior será a resistência equivalente a elas e menor será a corrente que passa no circuito; quanto maior o número de resistências em paralelo, menor será a resistência equivalente a elas e maior será a corrente que passa no circuito.

Exemplo

Suponha que as resistências ligadas em paralelo na fig. 20-25 tenham os seguintes valores: $R_1 = 40 \Omega$, $R_2 = 60 \Omega$ e $R_3 = 120 \Omega$.

a) Qual é o valor da resistência equivalente desta associação?

Vimos que, na associação em paralelo, a resistência equivalente, R , é dada por

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Então, teremos

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{40} + \frac{1}{60} + \frac{1}{120} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{R} = \frac{3+2+1}{120}$$

$$\text{donde} \quad \frac{1}{R} = \frac{6}{120} \quad \text{ou} \quad R = 20 \, \Omega$$

b) Considerando que a voltagem estabelecida pela bateria seja $V_{AB} = 12 \, \text{V}$, calcule a corrente que passa em cada uma das resistências.

Como as resistências estão ligadas em paralelo, cada uma delas estará submetida à voltagem $V_{AB} = 12 \, \text{V}$. Os valores de i_1 , i_2 e i_3 serão, assim, dados por:

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = \frac{12}{40} \quad \text{donde} \quad i_1 = 0,30 \, \text{A}$$

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{12}{60} \quad \text{donde} \quad i_2 = 0,20 \, \text{A}$$

$$i_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{12}{120} \quad \text{donde} \quad i_3 = 0,10 \, \text{A}$$

c) Qual é o valor da corrente total i fornecida pela bateria?

O valor desta corrente total será

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = 0,30 + 0,20 + 0,10 \quad \text{donde} \quad i = 0,60 \, \text{A}$$

Outra maneira de calcular esta corrente total seria supor que as resistências em paralelo fossem substituídas por sua resistência equivalente, isto é, imaginar que entre os pontos A e B tivéssemos uma resistência única $R = 20 \, \Omega$ (resistência equivalente). Nesta resistência passaria a corrente total i dada por:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{12}{20} \quad \text{donde} \quad i = 0,60 \, \text{A}$$

Observe que as duas maneiras de calcular a corrente total conduziram ao mesmo resultado, como não poderia deixar de ser.

COMENTÁRIOS

- 1) Deve-se observar que, sendo a resistência equivalente de uma associação em série, R , obtida pela soma das resistências associadas, o seu valor será maior do que o valor de qualquer uma das resistências da ligação. É também evidente que, quanto maior for o número de resistências associadas em série, maior será o valor da resistência equivalente.
- 2) Na associação em paralelo, sabemos que a resistência equivalente é dada por $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$. Analisando esta expressão, pode-se concluir que o valor de R é *menor* do que o valor de qualquer uma das resistências da associação (observe isto no exemplo que acabamos de resolver). Além disso, quanto maior for o número de resistências associadas em paralelo, *menor* será a resistência equivalente da associação. Assim, se associarmos em paralelo duas resistências iguais, cada uma de $60 \, \Omega$, a resistência equivalente desta ligação será

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{60} + \frac{1}{60} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{R} = \frac{2}{60} \quad \text{onde} \quad R = 30 \, \Omega$$

isto é, a resistência equivalente é igual à metade do valor de cada resistência associada. É fácil perceber que, se ligássemos, em paralelo, três resistências de

60 Ω, a resistência equivalente passaria a valer $R = 20 \Omega$. Estes resultados podem ser entendidos observando que a ligação de duas resistências iguais, em paralelo, corresponde a dobrar a área de uma delas, o que, portanto, faria o valor de sua resistência reduzir-se à metade. Da mesma forma, a ligação em paralelo de três resistências iguais corresponde a triplicar a área de uma delas.

3) Quando os elementos de um circuito elétrico estão todos ligados em série, a interrupção da corrente em qualquer ponto fará com que esta corrente seja interrompida em todos os elementos do circuito. Nas lâmpadas de uma árvore de Natal, por exemplo, que, como sabemos, são geralmente ligadas em série, quando qualquer uma delas se queima, todas as demais se apagam, pois a corrente deixará de circular em todas elas.

Entretanto, em nossas residências, sabemos que é possível apagar uma lâmpada qualquer sem que os demais aparelhos elétricos sejam desligados. Isto ocorre porque estes aparelhos estão ligados *em paralelo*. A fig. 20-26 mostra, de maneira simplificada, o esquema da rede elétrica de uma residência. Entre os fios *A* e *B* é mantida uma diferença de potencial cujo valor, normalmente, é de 120 V ou de 220 V. Vemos, pela figura, que os aparelhos elétricos são ligados em paralelo entre estes dois fios e estão, portanto, todos eles submetidos à mesma voltagem. Observe que uma das lâmpadas está apagada (a chave *C* está aberta) e, no entanto, todos os demais aparelhos estão funcionando normalmente.

Devemos notar que, quanto maior for o número de aparelhos elétricos ligados, menor será a resistência equivalente do conjunto, pois eles estão associados em paralelo. Conseqüentemente, maior será a corrente total que passará pelo medidor de energia elétrica situado na “entrada” da residência.

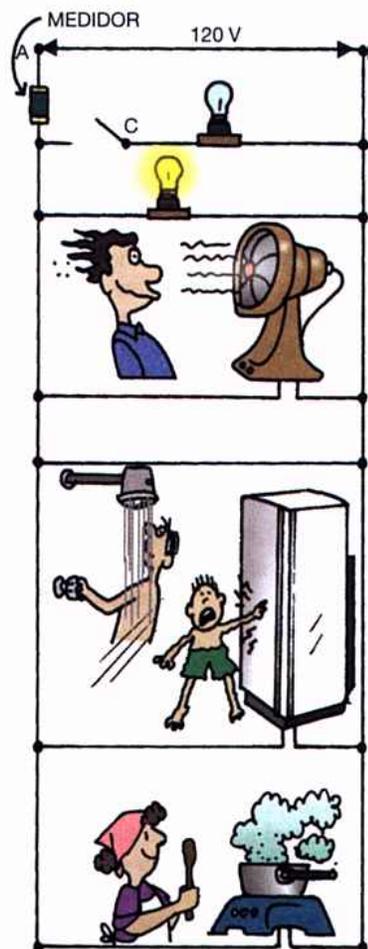


Fig. 20-26: Os aparelhos elétricos em uma residência são ligados em paralelo. Observe na ilustração que todos eles são submetidos à mesma voltagem.

Associação mista de resistências

No circuito da fig. I temos várias resistências associadas, em um conjunto denominado *associação mista*, por apresentar ligações em série e em paralelo. A análise de um circuito deste tipo pode ser facilmente entendida, acompanhando a solução das questões apresentadas a seguir. Considere os seguintes valores para as resistências do circuito mostrado:

$$R_1 = 30 \Omega; \quad R_2 = 30 \Omega; \quad R_3 = 60 \Omega; \quad R_4 = 20 \Omega; \quad R_5 = 15 \Omega$$

e que os pontos *C* e *D* estão ligados por um fio de resistência desprezível (resistência nula).

1.ª questão — Determinar a resistência equivalente deste circuito.

Como R_2 e R_3 estão ligadas em paralelo, a resistência R_{AB} entre *A* e *B*, é dada por:

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{30} + \frac{1}{60} \quad \text{donde} \quad R_{AB} = 20 \Omega$$

As resistências R_4 , R_5 e o fio de ligação entre *C* e *D* estão também em paralelo. Como o fio de ligação não oferece ne-

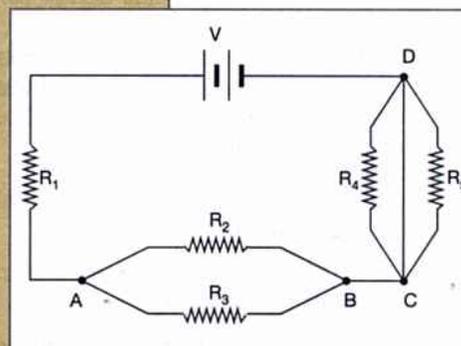


Figura I.

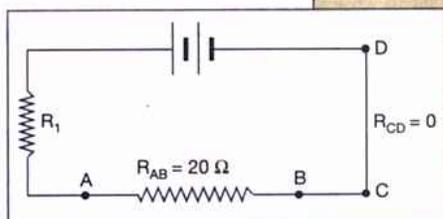


Figura II.

nhuma resistência à passagem da corrente, toda a corrente que chega em C passará por este fio, isto é, não haverá corrente nas resistências R_4 e R_5 . Então, a resistência total entre C e D é nula e o circuito da fig. I é equivalente ao mostrado na fig. II. Vemos, pois, que a resistência total desse circuito é:

$$R = R_1 + R_{AB} + R_{CD} = 30 + 20 \quad \text{ou} \quad R = 50 \, \Omega$$

2ª questão — Calcular a corrente em cada uma das resistências do circuito original, supondo que a bateria aplique ao circuito uma diferença de potencial $V = 12 \text{ V}$.

A corrente total i , fornecida pela bateria, é a mesma que passa pela resistência R_1 . Seu valor é:

$$i = \frac{V}{R} = \frac{12}{50} \quad \text{donde} \quad i = 0,24 \text{ A}$$

Para calcular as correntes i_2 , em R_2 , e i_3 , em R_3 , devemos determinar, inicialmente, a diferença de potencial V_{AB} entre A e B . Na fig. II é fácil perceber que

$$V_{AB} = R_{AB} \cdot i = 20 \times 0,24 \quad \text{ou} \quad V_{AB} = 4,8 \text{ V}$$

Então, temos (pela fig. I):

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{4,8}{30} \quad \text{donde} \quad i_2 = 0,16 \text{ A}$$

$$i_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{4,8}{60} \quad \text{donde} \quad i_3 = 0,08 \text{ A}$$

O valor de i , poderia, também, ter sido obtido da seguinte maneira:

$$i = i_2 + i_3 \quad \text{ou} \quad 0,24 = 0,16 + i_3 \quad \text{donde} \quad i_3 = 0,08 \text{ A}$$

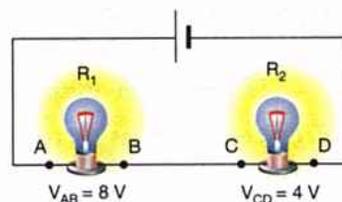
Os valores das correntes em R_4 e R_5 , como já vimos, são nulos.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

21. A figura deste exercício mostra duas lâmpadas, cujos filamentos possuem resistências R_1 e R_2 , ligadas aos pólos de uma bateria. Observando a figura, responda:

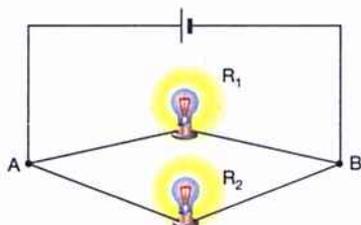
- A corrente que passa em R_1 é maior, menor ou igual à que passa em R_2 ?
- O valor da resistência R_1 é maior, menor ou igual ao da resistência R_2 ?
- Qual é o valor da voltagem entre os pólos da bateria?



Exercício 21.

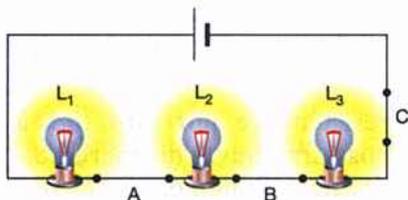
22. As duas lâmpadas do exercício anterior foram ligadas, da maneira mostrada na figura deste exercício, a uma bateria que mantém entre seus pólos uma diferença de potencial de 6 V.

- a) Qual a voltagem que está aplicada em R_1 ? E em R_2 ?
- b) A corrente que passa em R_1 é maior, menor ou igual à que passa em R_2 ?



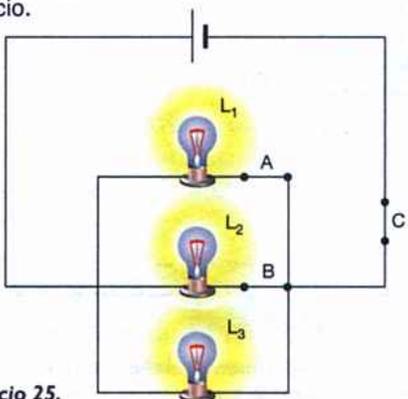
Exercício 22.

23. Suponha que, na fig. 20-23, as resistências tenham os seguintes valores: $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 18 \Omega$ e $R_3 = 20 \Omega$. Sabe-se que a bateria estabelece no circuito uma diferença de potencial $V_{AD} = 24 \text{ V}$.
- a) Qual é o valor da resistência equivalente da associação?
 - b) Qual é o valor da corrente que passa em R_1 ? E em R_2 ? E em R_3 ?
 - c) Quais são os valores das voltagens V_{AB} , V_{BC} e V_{CD} ?
24. Considerando o circuito mostrado na figura deste exercício, dizer quais das lâmpadas L_1 , L_2 e L_3 se apagarão ao desligarmos:
- a) Apenas a chave A.
 - b) Apenas a chave B.
 - c) Apenas a chave C.



Exercício 24.

25. Responda às questões do exercício anterior supondo que as lâmpadas L_1 , L_2 e L_3 tenham sido ligadas, agora, da maneira mostrada na figura deste exercício.



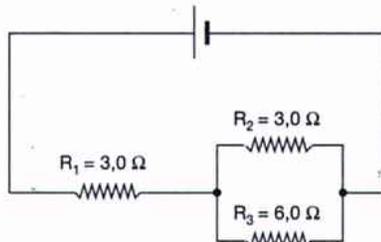
Exercício 25.

26. Duas resistências R_1 e R_2 , sendo $R_1 = R_2 = 12 \Omega$, são ligadas em paralelo a uma bateria que estabelece, na associação, uma voltagem de 24 V .
- a) Faça uma figura esquemática deste circuito.
 - b) Qual é a resistência equivalente da associação?
 - c) Qual é a corrente que passa em R_1 ? E em R_2 ?
 - d) Qual é a corrente total fornecida pela bateria?

27. No exercício anterior, suponha que uma terceira resistência, R_3 , também igual a 12Ω , fosse ligada em paralelo com as outras duas resistências. Sabendo-se que a voltagem estabelecida pela bateria permanece inalterada, responda:
- a) A resistência equivalente da associação aumenta, diminui ou não se modifica?
 - b) Os valores das correntes em R_1 e R_2 aumentam, diminuem ou não se modificam?
 - c) Qual será o valor da corrente em R_3 ?
 - d) A corrente total fornecida pela bateria aumenta, diminui ou não se modifica?

28. Suponha que, em uma residência, cuja instalação elétrica é de 120 V , esteja acesa apenas uma lâmpada de resistência igual a 240Ω .
- a) Qual é o valor da corrente que passa nesta lâmpada?
 - b) Se acendermos uma segunda lâmpada, idêntica à primeira, a resistência elétrica da instalação da residência aumentará ou diminuirá?
 - c) Com as duas lâmpadas acesas, qual é o valor da corrente que está passando pelo medidor na entrada de eletricidade da residência?
 - d) Sabe-se que a chave automática existente na entrada de eletricidade da residência é de 30 A , isto é, ela se desliga se for percorrida por uma corrente superior a 30 A . Então, quantas lâmpadas (idênticas àquela citada), no máximo, poderão ser ligadas simultaneamente nesta residência?

29. Considerando o circuito mostrado na figura deste exercício e sabendo que a voltagem entre os pólos da pilha é de $1,5 \text{ V}$, determine:
- a) A resistência equivalente à associação das resistências R_2 e R_3 .
 - b) A resistência total equivalente à associação de R_1 , R_2 e R_3 .
 - c) A corrente que a pilha está fornecendo ao circuito.



Exercício 29.

20.6. Instrumentos elétricos de medida

Trabalhando com circuitos elétricos nos laboratórios, temos freqüentemente necessidade de conhecer valores de várias grandezas envolvidas nestes circuitos. Analisaremos, a seguir, como podemos medir, usando aparelhos apropriados, três grandezas importantes em um circuito elétrico qualquer: a intensidade da corrente, a diferença de potencial e a resistência elétrica.

MEDIDA DE CORRENTE ELÉTRICA

Qualquer aparelho que indique a presença de corrente elétrica em um circuito é denominado *galvanômetro*. Se a escala deste aparelho for graduada de tal maneira que seja possível medir a intensidade da corrente elétrica, o aparelho receberá o nome de *amperímetro*. Na fig. 20-27-a vemos a fotografia de um amperímetro comumente usado em laboratórios de ensino, de pesquisa e de trabalhos técnicos em eletricidade. A fig. 20-27-b mostra como são representados esquematicamente os amperímetros nos diagramas de circuitos elétricos.

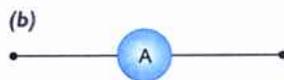
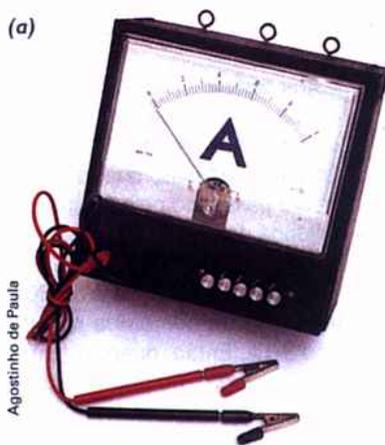


Fig. 20-27: Foto de um amperímetro usado em laboratórios de ensino (a) e maneira de representá-lo em um diagrama de circuito elétrico (b).

Existem amperímetros destinados a medir correntes de valores mais elevados. Neste caso, a escala do aparelho é graduada em ampères. Outros amperímetros são mais sensíveis e podem medir correntes de menor valor, sendo, então, suas escalas graduadas em miliampères ($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$) ou em microampères ($1 \text{ } \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$). Estes aparelhos costumam ser denominados, respectivamente, *miliamperímetros* e *microamperímetros*.

Quando desejamos medir a corrente que passa, por exemplo, em uma certa resistência, devemos ligar o amperímetro no circuito da maneira mostrada na fig. 20-28: o amperímetro é ligado *em série* com a resistência e, portanto, toda a corrente que passa nesta resistência passará através do aparelho. Nessas condições, o ponteiro se deslocará ao longo da escala, indicando diretamente o valor desta corrente.

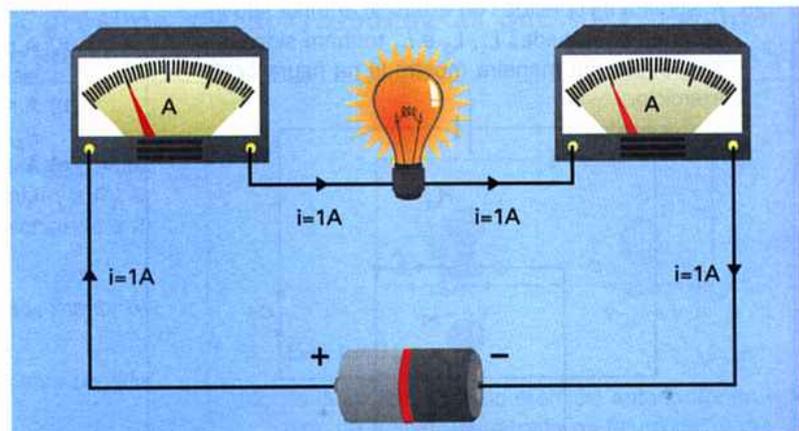


Ilustração esquemática. Os dois amperímetros estão sendo usados para mostrar que a intensidade da corrente tem o mesmo valor antes e depois da lâmpada.

No interior do amperímetro existem fios condutores que devem ser percorridos pela corrente elétrica, para que o aparelho indique o valor desta corrente. Estes fios apresentam uma certa resistência elétrica, que é denominada *resistência interna* do amperímetro. Assim, ao introduzirmos um amperímetro em um circuito (como na fig. 20-28), sua resistência interna será acrescentada à resistência do circuito. Para que a perturbação causada por esta introdução seja desprezível, o amperímetro deve ser construído de tal modo que sua resistência interna seja *a menor possível*.

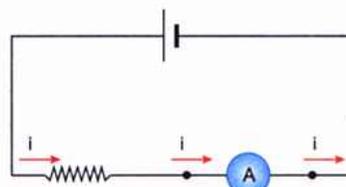


Fig. 20-28: O amperímetro deve ser colocado em série no circuito para indicar a corrente que o atravessa. Ilustração esquemática.

MEDIDA DE VOLTAGEM

A medida da diferença de potencial entre dois pontos é feita por aparelhos denominados *voltímetros*. A fig. 20-29 mostra, em (a), a fotografia de um tipo comum de voltímetro e, em (b), a maneira de representar este aparelho nos diagramas de circuitos elétricos.

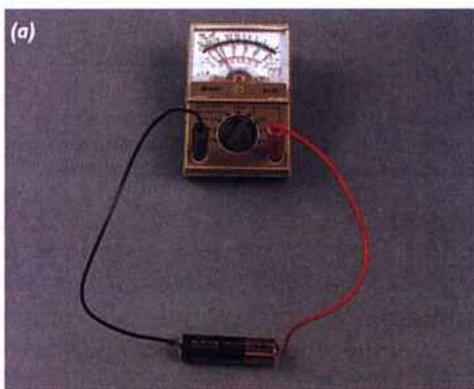


Fig. 20-29: Foto de um voltímetro sendo usado para medir a voltagem entre os pólos de uma pilha (a) e maneira de representá-lo em um diagrama de circuito elétrico (b).

Se desejarmos medir a diferença de potencial que existe, por exemplo, entre as extremidades de uma resistência, devemos ligar um voltímetro da maneira mostrada na fig. 20-30. Como vemos, o voltímetro deve ser ligado *em paralelo* com a resistência. Assim, parte da corrente que chega no ponto A (veja a fig. 20-30) se desvia, passando pelo voltímetro, o que faz com que o ponteiro se desloque ao longo da escala do aparelho e indique diretamente o valor da voltagem V_{AB} .

Do mesmo modo que o amperímetro, o voltímetro possui também uma *resistência interna*. É desejável que a corrente que se desvia para o voltímetro seja a menor possível, para que a perturbação causada no circuito, pela introdução do aparelho, seja desprezível. Como sabemos, esta corrente será tanto menor quanto maior for a resistência do voltímetro. Por este motivo, este aparelho deve ser fabricado de tal modo que sua resistência interna seja *a maior possível*.

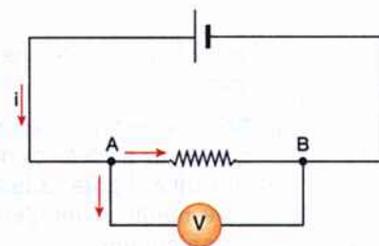


Fig. 20-30: Ilustração esquemática. O voltímetro ligado em paralelo nos extremos da resistência fornece a voltagem aplicada a ela.

MEDIDA DE RESISTÊNCIA

A medida direta do valor de uma resistência elétrica R pode ser feita por meio de aparelhos denominados *ohmímetros*. A fig. 20-31-a é uma fotografia de um aparelho que pode funcionar como amperímetro, voltímetro e ohmímetro. Por este

motivo, este aparelho é denominado *multímetro*. Quando o multímetro está adaptado para ser usado como ohmímetro, basta ligar a resistência R desconhecida aos terminais A e B do aparelho (como mostra a fig. 20-31-b) para obter o seu valor. A simples leitura da posição do ponteiro sobre a escala nos fornecerá o valor de R .

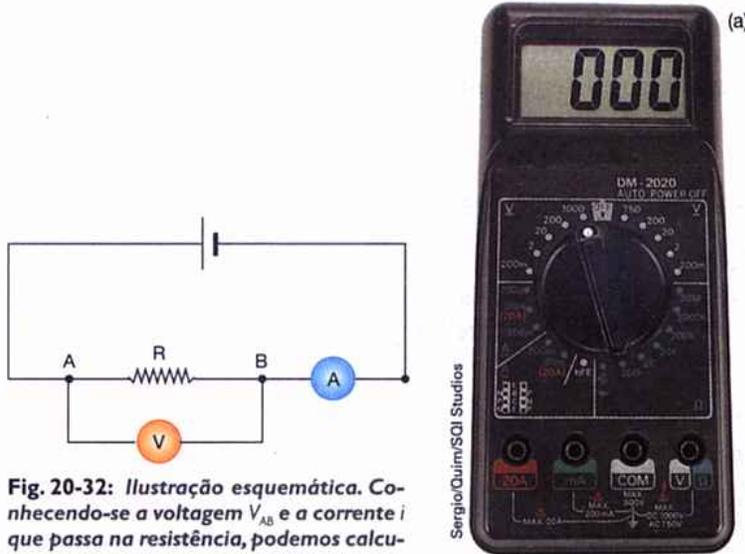


Fig. 20-32: Ilustração esquemática. Conhecendo-se a voltagem V_{AB} e a corrente i que passa na resistência, podemos calcular o seu valor pela relação $R = V_{AB}/i$.

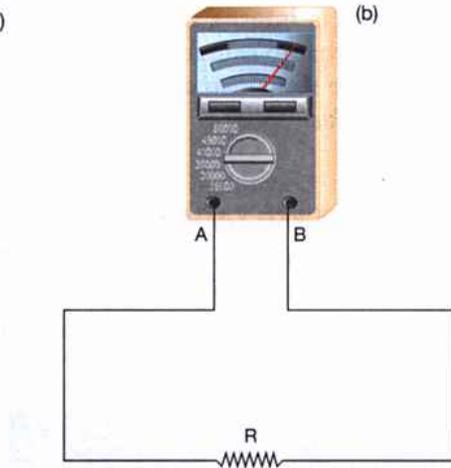


Fig. 20-31: O multímetro é um aparelho que, possuindo várias escalas, pode ser usado como amperímetro, voltmímetro e ainda como ohmímetro.

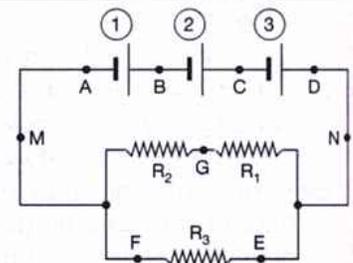
A medida de uma resistência poderá também ser feita usando-se um voltmímetro e um amperímetro. Neste caso, estes aparelhos devem ser ligados da maneira mostrada na fig. 20-32. O voltmímetro nos fornece o valor da voltagem V_{AB} entre os extremos da resistência R , e o amperímetro indica o valor da corrente i que passa por essa resistência. Evidentemente, o valor de R será obtido pela relação $R = V_{AB}/i$.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

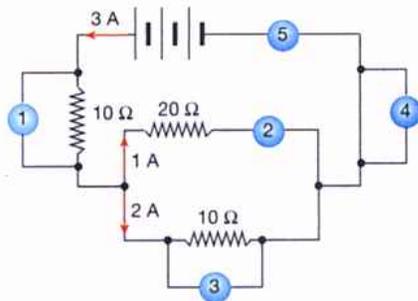
30. As questões seguintes referem-se ao circuito mostrado na figura deste exercício.

- Desenhe, em uma cópia da figura, como você deverá ligar um voltmímetro para medir a diferença de potencial entre os pólos da pilha 1.
- Desenhe, agora, a ligação que deveria ser feita com o voltmímetro para medir a voltagem que a associação de pilhas está aplicando no circuito.
- Entre os pontos assinalados na figura, indique aquele onde deveria ser ligado um amperímetro para medir a corrente que passa na resistência R_1 . E na resistência R_2 ?
- Considerando os pontos A , E , F , G , M e N , em quais deles poderia ser colocado um amperímetro para medir a corrente que passa em R_3 ?
- Considerando os pontos da questão anterior, em quais deles poderia ser colocado um amperímetro para medir a corrente total fornecida pelas pilhas ao circuito?



Exercício 30.

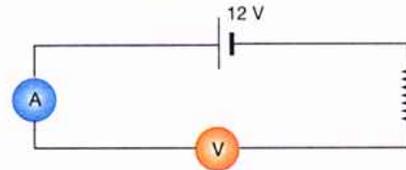
31. A figura deste exercício mostra um circuito elétrico no qual foram ligados vários aparelhos de medida. Sabendo-se que estes aparelhos estão ligados corretamente, identifique aqueles que são amperímetros e os que são voltímetros.



Exercício 31.

32. Considerando o circuito do exercício anterior, diga qual será a leitura de cada um dos aparelhos mostrados.

33. Uma pessoa, desejando medir a voltagem e a corrente em uma resistência, ligou o voltímetro de maneira incorreta, como mostra a figura deste exercício. Nestas condições, qual será a leitura do amperímetro? Por quê?



Exercício 33.

34. Suponha que você tenha uma pilha, um amperímetro, um voltímetro e uma resistência desconhecida R .
- Faça um desenho mostrando como você ligaria estes elementos de modo a obter dados que lhe permitam determinar o valor de R .
 - Ligando-se corretamente os elementos, se a leitura do voltímetro fosse 1,5 V e a do amperímetro 0,10 A, qual seria o valor de R ?

20.7. Potência em um elemento do circuito

TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

De uma maneira geral, os aparelhos elétricos são dispositivos que transformam energia elétrica em outra forma de energia. Por exemplo: em um motor elétrico, a energia elétrica é transformada em energia mecânica de rotação do motor; em um aquecedor, a energia elétrica é transformada em calor; em uma lâmpada de vapor de mercúrio, a energia elétrica é transformada em energia luminosa etc.

Para melhor entender estas transformações, consideremos o circuito mostrado na fig. 20-33, no qual uma bateria estabelece uma diferença de potencial V_{AB} entre os pontos A e B . Suponha que entre estes pontos esteja ligado um aparelho elétrico qualquer (como, por exemplo, um daqueles mostrados na figura). Como sabemos, sendo $V_A > V_B$, uma corrente elétrica i estará passando, de A para B , através do aparelho. As cargas elétricas que constituem a corrente estarão, então, passando de um ponto onde elas possuem maior energia elétrica (ponto A) para outro onde elas possuem menor energia (ponto B). Em outras palavras, as cargas elétricas *estarão perdendo energia elétrica* ao passarem de A (potencial maior) para B (potencial menor). Esta energia que as cargas perdem, evidentemente, não desaparece: ela é transferida para o aparelho, aparecendo sob outra forma de energia. Como vimos, a forma de energia na qual a energia elétrica é transformada dependerá do aparelho que estiver intercalado entre A e B .

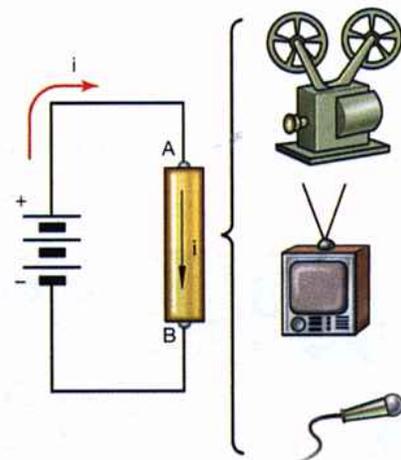


Fig. 20-33: Quando as cargas elétricas passam de A para B , elas perdem energia elétrica que aparece sob outra forma de energia no aparelho intercalado entre A e B .

POTÊNCIA DESENVOLVIDA EM UM APARELHO ELÉTRICO

A quantidade de energia elétrica que é transferida ao aparelho ligado entre os pontos A e B da fig. 20-33 pode ser calculada da maneira que mostraremos a seguir. Considerando a corrente i que passa no aparelho durante um intervalo de tempo Δt , teremos uma carga $\Delta q = i\Delta t$ deslocando-se de A para B . Lembrando-se da definição de diferença de potencial, podemos concluir que o campo elétrico existente entre A e B realizará, sobre a carga Δq , um trabalho $T_{AB} = \Delta q \cdot V_{AB}$. Portanto, a carga Δq receberá, do campo elétrico, uma quantidade de energia ΔE igual a este trabalho, isto é, $\Delta E = \Delta q \cdot V_{AB}$. Como não há aumento na energia cinética da carga, concluímos que a energia ΔE recebida por Δq será transferida para o aparelho. Então, a quantidade de energia que aparece no aparelho ligado entre A e B , durante o intervalo de tempo Δt , é dada por

$$\Delta E = \Delta q \cdot V_{AB}$$

Geralmente, temos necessidade de conhecer a *potência*, P , desenvolvida pelo aparelho elétrico que, como vimos no capítulo 8, é dada por $P = \Delta E/\Delta t$. Dividindo-se, então, os dois membros da equação $\Delta E = \Delta q \cdot V_{AB}$ por Δt , virá

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \cdot V_{AB} \quad \text{ou} \quad \boxed{P = iV_{AB}}$$

Chegamos, portanto, ao seguinte resultado:

se um aparelho elétrico, ao ser submetido a uma diferença de potencial V_{AB} , for percorrido por uma corrente i , a potência desenvolvida neste aparelho será dada por

$$P = iV_{AB}$$

Exemplo 1

A bateria de um automóvel aplica uma voltagem $V_{AB} = 12$ V nos terminais do seu motor de arranque, o qual, ao ser acionado, é percorrido por uma corrente $i = 50$ A. Qual é, então, a potência desenvolvida por este motor elétrico?

Esta potência será

$$P = iV_{AB} = 50 \times 12 \quad \text{donde} \quad P = 600 \text{ W}$$

Como i e V_{AB} foram expressas em unidades do S. I., evidentemente o valor de P será expresso em watts. É fácil verificar que realmente isto ocorre, lembrando-se que

$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ e $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$. Então:

$$1 \text{ A} \cdot 1 \text{ V} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ watt} = 1 \text{ W}$$

Portanto, o resultado $P = 600 \text{ W}$ significa que, a cada 1 s, 600 J de energia elétrica são transformados em energia mecânica de rotação do motor (estamos desprezando as perdas por aquecimento no motor).

Medida da energia elétrica usada em uma residência

Na entrada de eletricidade de uma residência, existe um medidor, instalado pela companhia de eletricidade (procure observar o medidor de sua residência). O objetivo desse aparelho é medir a quantidade de energia elétrica usada na residência durante um certo tempo (normalmente 30 dias). Sabemos que:

$$\text{Potência} = \frac{\text{energia}}{\text{tempo}} \Rightarrow \text{energia} = \text{potência} \times \text{tempo, isto é:}$$

$$E = P \cdot t$$

Portanto, quanto maior for a potência de um aparelho eletrodoméstico e quanto maior for o tempo que ele permanecer ligado, maior será a quantidade de energia elétrica que ele utilizará (transformando-a em outras formas). O valor registrado no medidor equivale à soma das energias utilizadas, durante um certo período, pelos diversos aparelhos instalados na casa.

Essa energia poderia ser medida em joules (unidade do S.I.). Em praticamente todos os países do mundo, entretanto, as companhias de eletricidade usam medidores calibrados em kWh (quilowatt-hora). Sabe-se que 1 kWh é uma unidade de energia equivalente a 3 600 000 J. O seguinte exemplo ilustra o uso desta unidade de energia:

- a) Em uma casa há um aquecedor elétrico de água, cuja potência é $P = 500 \text{ W}$ e que permanece ligado durante um tempo $t = 4 \text{ h}$ diariamente. Determine, em kWh, a quantidade de energia elétrica que esse aquecedor utiliza por dia.

Para obter a resposta em kWh, devemos expressar P em kW e t em horas. Como $1 \text{ kW} = 1 000 \text{ W}$, é claro que $P = 0,5 \text{ kW}$. Então, de $E = P \cdot t$, vem:

$$E = 0,5 \text{ kW} \times 4 \text{ h} \Rightarrow E = 2 \text{ kWh (por dia)}$$

- b) Sabendo-se que o custo de 1 kWh de energia elétrica é R\$ 0,08, quanto deveria ser pago à companhia de eletricidade pelo funcionamento desse aquecedor, nas condições mencionadas, durante 30 dias?

A energia total utilizada pelo aquecedor seria:

$$E_T = 30 \times 2 \text{ kWh} \text{ ou } E_T = 60 \text{ kWh}$$

O preço solicitado seria, então:

$$60 \times \text{R\$ } 0,08 = \text{R\$ } 4,80.$$

EFEITO JOULE

Suponhamos que o aparelho ligado entre os pontos A e B da fig. 20-33 fosse uma resistência elétrica R . Verifica-se que, neste caso, a energia elétrica perdida pelas cargas, ao passarem de A para B , transforma-se integralmente em *energia térmica*, isto é, a resistência se aquecerá, podendo-se observar uma transferência de calor do resistor para o meio ambiente (fig. 20-34 da página seguinte). Este fenômeno foi estudado, no século XIX, pelo famoso cientista James P. Joule e, em homenagem a ele, é denominado *efeito Joule*.

Podemos entender por que ocorre o efeito Joule lembrando que os elétrons que constituem a corrente, ao passarem pela resis-



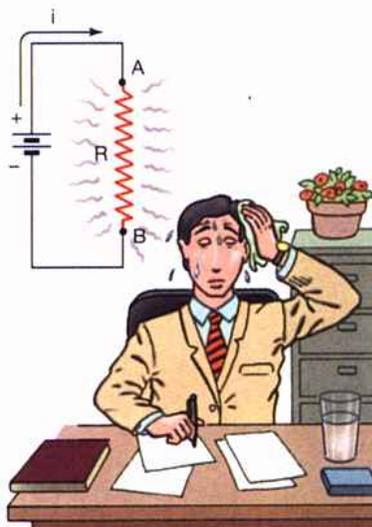


Fig. 20-34: Ao passar em uma resistência as cargas elétricas perdem energia elétrica que se transforma totalmente em calor. Este fenômeno é denominado efeito Joule.

tência, colidem sucessivamente com os átomos ou moléculas do material de que ela é feita. Estas colisões provocam um aumento na energia de vibração destes átomos, o que, como já sabemos, causa uma elevação na temperatura da substância. Assim, a energia elétrica dos elétrons da corrente é transferida, em forma de energia térmica, para a resistência.

Vimos que a potência desenvolvida em um aparelho, pela passagem de uma corrente elétrica através dele, é dada por $P = iV_{AB}$. No caso particular do efeito Joule, temos $V_{AB} = Ri$, uma vez que é uma resistência R que está intercalada entre A e B . Então, a potência poderá ser também expressa da seguinte maneira:

$$P = iV_{AB} = i \cdot Ri \quad \text{ou} \quad P = Ri^2$$

Em resumo, podemos escrever:

o efeito Joule consiste na transformação de energia elétrica em energia térmica (calor) em uma resistência percorrida por uma corrente elétrica. Sendo R o valor da resistência, V_{AB} a voltagem nela aplicada e i a corrente que a percorre, a potência desenvolvida, por efeito Joule, nesta resistência, pode ser calculada pelas expressões:

$$P = iV_{AB} \quad \text{ou} \quad P = Ri^2$$

É importante observar que as expressões $P = iV_{AB}$ e $P = Ri^2$ fornecem a *potência* desenvolvida no aparelho, isto é, a quantidade de energia produzida por *unidade de tempo*. Se o aparelho permanecer ligado durante um intervalo de tempo Δt e desejarmos calcular a energia total ΔE nele desenvolvida durante este tempo, devemos multiplicar a potência P pelo intervalo de tempo Δt , isto é, $\Delta E = P \cdot \Delta t$.

APLICAÇÕES DO EFEITO JOULE

- 1) Todos os dispositivos elétricos que são utilizados para aquecimento se baseiam no efeito Joule. Assim, um esquentador, um chuveiro, um ferro elétrico, um forno elétrico etc., consistem essencialmente em uma resistência que é aquecida ao ser percorrida por uma corrente (fig. 20-35).

Fig. 20-35: Todos os aparelhos elétricos usados para aquecimento se baseiam no efeito Joule. Ilustração esquemática.

Em alguns países, é muito comum o uso de chuveiros elétricos. Essa fotografia mostra um corte de um chuveiro elétrico, podendo-se ver a resistência usada para aquecer a água.



- 2) As lâmpadas de incandescência (lâmpadas de filamento), criadas no século XIX pelo inventor americano Thomas Edison, constituem também uma aplicação do efeito Joule. Os filamentos destas lâmpadas são geralmente feitos de tungstênio, que é um metal cujo ponto de fusão é muito elevado. Assim, estes filamentos, ao serem percorridos por uma corrente elétrica, se aquecem e podem alcançar altas temperaturas (cerca de $2\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$), tornando-se incandescentes e emitindo grande quantidade de luz (fig. 20-36).

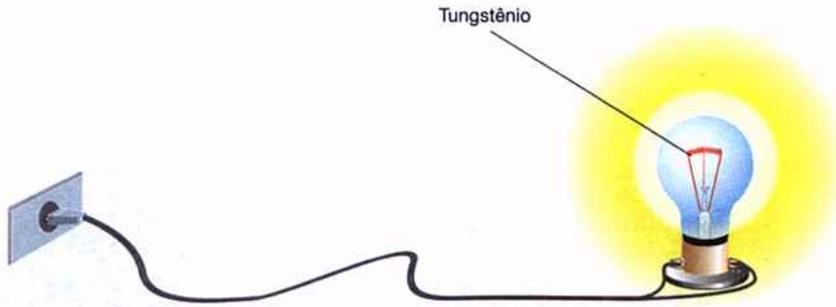


Fig. 20-36: O filamento de uma lâmpada alcança altas temperaturas tornando-se incandescente.

Ao ligarmos o interruptor do circuito de uma lâmpada, quanto tempo decorre até que ela emita luz?

Os elétrons, em um circuito no qual há uma corrente elétrica, movem-se com velocidade muito pequena (apenas $0,1\text{ mm/s}$, aproximadamente). Entretanto, quando ligamos o interruptor do circuito, o campo elétrico que surge no condutor é estabelecido quase que instantaneamente em todo o fio, pois a velocidade de propagação deste campo é praticamente igual à da luz. Então, em um tempo muito curto (cerca de 10^{-9} s) todos os elétrons livres do fio já estão em movimento, embora os elétrons que começaram a se mover nas proximidades do interruptor só alcancem o filamento depois de um tempo muito longo. Portanto, os elétrons que provocam o aquecimento imediato da lâmpada são aqueles presentes em seu próprio filamento.

Para a lâmpada passar a emitir luz visível, seu filamento deverá atingir, como vimos, uma temperatura muito elevada. Até que esta temperatura seja atingida, decorre um tempo entre $0,01\text{ s}$ e $0,1\text{ s}$ após a corrente ser estabelecida. Este intervalo de tempo também é muito pequeno para que possa ser percebido.

- 3) Outra aplicação do efeito Joule é encontrada na construção de fusíveis, que são dispositivos usados para limitar a corrente que passa em um circuito elétrico como, por exemplo, em um automóvel, em uma residência, em um aparelho elétrico etc.

Este dispositivo é constituído por um filamento metálico, geralmente de chumbo, que tem baixo ponto de fusão (fig. 20-37-a). Desta maneira, quando a corrente que passa no fusível ultrapassa um certo valor (próprio de cada fusível), o calor gerado pelo efeito Joule provoca a fusão do filamento, interrompendo a passagem da corrente.

Na fig. 20-38 mostramos um fusível instalado no circuito elétrico de uma residência. À medida que os aparelhos 1, 2, 3 etc. vão sendo ligados, a corrente que entra na residência, através do fusível, vai se tornando cada vez maior. Se não existisse o fusível e o número de aparelhos ligados fosse muito

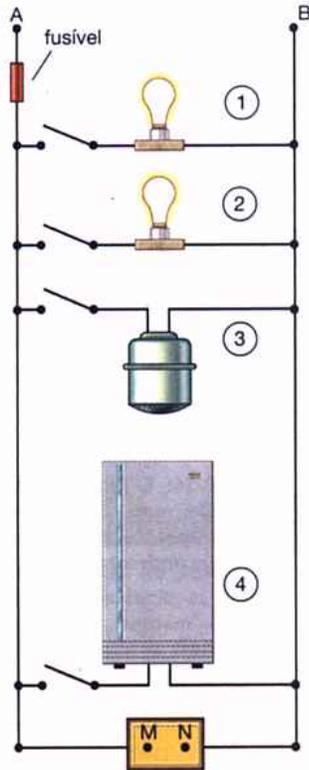


Fig. 20-38: Unindo-se os pontos M e N com fio de resistência desprezível, o fusível se queima.



Fig. 20-39: Curto-circuito provocado por contato entre os fios de ligação.

grande, a corrente que circularia na instalação poderia se tornar bastante intensa. Isto provocaria um aquecimento indesejável e até mesmo perigoso dos fios de ligação. O fusível impede que isto aconteça porque, ao se fundir, interrompe a passagem da corrente quando ela atinge um valor dentro dos limites de segurança.

Atualmente, como você já deve saber, os fusíveis nas residências são substituídos por chaves automáticas, como aquela mostrada na fig. 20-37-b. Nestas chaves, o aquecimento de um dispositivo metálico provoca sua dilatação, fazendo com que a chave se desligue. Entretanto, em muitos outros circuitos elétricos como, por exemplo, nos automóveis, os fusíveis continuam sendo empregados como sistema de proteção.

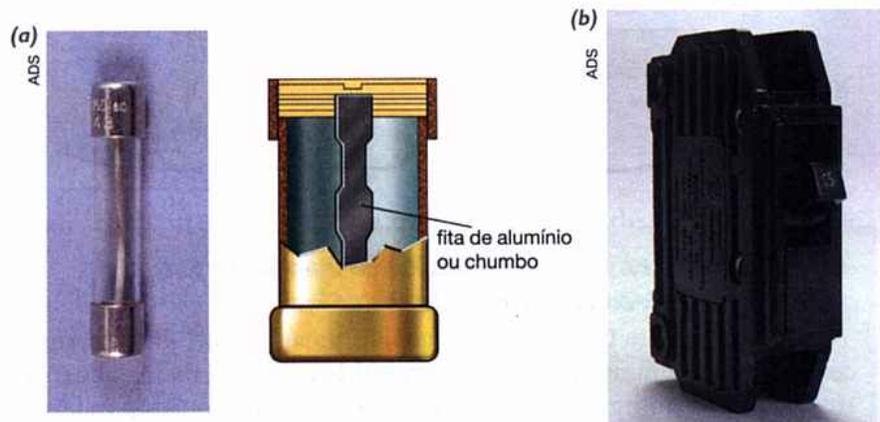


Fig. 20-37: Estes interruptores de corrente (fusível (a) e chave automática (b)) têm seu funcionamento baseado no efeito Joule.

- 4) O fusível e a chave automática protegem também o circuito elétrico se ocorrer um curto-circuito. Este fenômeno acontece quando, por um motivo qualquer, a resistência total do circuito torna-se muito pequena, fazendo com que a corrente, naquele circuito, atinja valores extremamente elevados.

Consideremos, por exemplo, na fig. 20-38, os pontos M e N que estão representando os terminais de uma tomada elétrica. Se ligássemos estes pontos por um fio de resistência desprezível, a resistência total do circuito praticamente se anularia. Nestas condições, o valor da corrente se tornaria muito elevado, isto é, estaríamos provocando um curto-circuito na instalação elétrica da residência. Este elevado valor da corrente faz com que o fusível ou a chave interrompam o circuito, impedindo que ocorram efeitos desagradáveis, como aquele mostrado na fig. 20-39.

O que é um curto-circuito

Em funcionamento normal, uma lâmpada ligada a uma tomada (fig. I) recebe uma corrente elétrica que passa pelo circuito ABCDEF. Se por um motivo qualquer (por exemplo, desgaste do encapamento dos fios), entretanto, houver um contato elétrico entre dois pontos do circuito, como os pontos B e E na figura, uma nova corrente elétrica será estabelecida, passando toda ela apenas pelo circuito ABEF (nenhuma corrente passará pela lâm-

pada). Como esse circuito é constituído apenas por fios de ligação, sua resistência é praticamente nula e, então, a intensidade da corrente nele torna-se muito elevada. Em virtude do efeito Joule, há um considerável aumento de temperatura nesses fios, que pode provocar efeitos desastrosos se não houver uma proteção adequada (fusível ou chave automática).

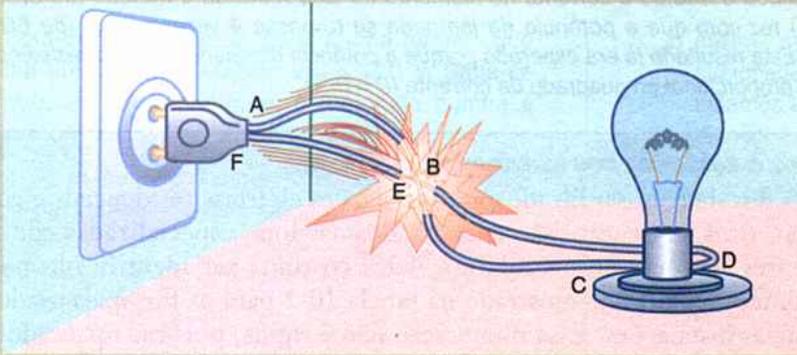


Fig. 1: Na figura esquemática está ocorrendo um curto-circuito em virtude do contato entre os pontos B e E.

Quando isso ocorre, dizemos que está havendo um **curto-circuito** nos pontos B e E. A origem dessa expressão está no fato de que, havendo o contato descrito, a corrente passa por um circuito (ABEF) **menor** que o circuito original (ABCDEF). Por extensão, toda vez que dois pontos de um circuito qualquer são ligados por um fio de resistência nula, dizemos que estamos estabelecendo um curto-circuito entre esses pontos.

Exemplo 2

Em uma lâmpada comum encontramos as seguintes especificações do fabricante: 60 W; 120 V.

a) Qual é o significado destas especificações?

A especificação 120 V indica que a lâmpada deverá ser submetida a uma voltagem com este valor. Nestas condições, a lâmpada dissipará uma potência de 60 W, como indica a outra especificação.

Se a lâmpada for ligada em uma voltagem superior a 120 V (por exemplo, em uma tomada de 220 V), ela dissipará uma potência maior do que 60 W e, provavelmente, se queimará. Por outro lado, se a voltagem aplicada à lâmpada for inferior a 120 V, ela apresentará um brilho inferior ao normal, pois estará dissipando uma potência menor do que 60 W.

b) Supondo que esta lâmpada esteja ligada à voltagem adequada (120 V), determine a intensidade da corrente que passa em seu filamento.

A expressão $P = iV_{AB}$ nos permite determinar o valor de i , pois conhecemos $P = 60$ W e $V_{AB} = 120$ V. Então

$$i = \frac{P}{V_{AB}} = \frac{60}{120} \quad \text{donde} \quad i = 0,50 \text{ A}$$

c) Qual é a resistência do filamento desta lâmpada?

Lembrando da definição de resistência, teremos

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{120}{0,50} \quad \text{donde} \quad R = 240 \Omega$$

- d) Se esta lâmpada for ligada a uma voltagem tal que a corrente que passa em seu filamento seja $i = 0,25$ A, qual será a potência que ela dissipará?

Supondo constante a resistência do filamento, a expressão $P = Ri^2$ nos fornecerá esta potência:

$$P = Ri^2 = 240 \times (0,25)^2 \quad \text{donde} \quad P = 15 \text{ W}$$

Observe que o fato de a corrente no filamento ter sido reduzida à metade (de 0,50 A para 0,25 A) fez com que a potência da lâmpada se tornasse 4 vezes menor (de 60 W para 15 W). Este resultado já era esperado porque a potência dissipada em uma resistência constante é proporcional ao quadrado da corrente ($P = Ri^2$).

Riscos e cuidados nas instalações elétricas

- ▶ Os fios de cobre utilizados nas instalações elétricas residenciais e comerciais (fios de ligação) são encontrados nas lojas especializadas com diferentes secções retas. Cada um deles costuma ser identificado por um número, como está mostrado na tabela 20-2 para os fios mais usados naquelas instalações. Essa numeração não é rígida, pois cada país adota seu próprio código. No Brasil, atualmente, os fios são identificados pelos valores de suas secções retas. Entretanto, os técnicos e engenheiros ainda se referem aos números que aparecem na tabela, os quais correspondem aproximadamente àqueles de um código muito difundido nos Estados Unidos. Observe que o número de um fio é tanto menor quanto maior for sua secção reta (por exemplo, o fio 14 é mais fino do que o fio 12).
- ▶ Quando um engenheiro projeta a instalação elétrica de uma residência como aquela da fig. 20-38, conhecendo a corrente que vai passar em cada aparelho e, conseqüentemente, a corrente total na ligação principal, ele deverá escolher adequadamente a secção (ou número) de cada fio que irá usar. Se o fio escolhido para a linha principal for muito fino (resistência grande), quando a corrente que por ele passa for aumentando, em virtude de vários aparelhos serem ligados à rede, a queda de tensão neste fio poderá não ser desprezível. Isto costuma acarretar um mau funcionamento daqueles aparelhos, pois eles ficarão submetidos a uma voltagem inferior àquela para a qual foram projetados. Você já deve ter observado este efeito, em uma residência, quando o brilho das lâmpadas diminui, ao ser ligado um chuveiro elétrico, por exemplo. Quando a escolha é bem feita, sendo usado um fio de ligação com secção maior (menor resistência), a queda de tensão nele torna-se desprezível, e não há alteração sensível em um aparelho quando outros são ligados à rede. Evidentemente, esses cuidados devem ser tomados em qualquer instalação elétrica, inclusive nos fios que ligam uma residência à rede elétrica da rua.
- ▶ A tabela 20-2 apresenta também o valor máximo da corrente que cada fio pode transportar, sem aquecimento excessivo que possa comprometer seu isolamento, isto é, sem danificar a capa de plástico que o envolve. A danificação deste isolamento pode trazer sérias conseqüências (curto-circuitos, com possibilidades de provocar incêndios).

Corrente máxima para fios de diferentes secções retas

nº do fio	Secção (mm ²)	$i_{máx}$ (A)
14	1,5	15
12	2,5	20
10	4,0	30
8	6,0	40

Tabela 20-2.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

35. Uma bomba d'água é ligada a uma tomada que lhe aplica uma voltagem $V_{AB} = 120$ V. Sabe-se que, em funcionamento, o motor da bomba é percorrido por uma corrente $i = 2,5$ A.
- As cargas elétricas, ao atravessarem o motor da bomba, perdem ou ganham energia elétrica?
 - Para onde se transfere esta energia perdida pelas cargas?
 - Qual a potência que é desenvolvida neste motor?
 - Se a bomba funcionar durante 10 minutos, qual a quantidade de energia que será desenvolvida nesta bomba?
36. Uma resistência elétrica R , na qual passa uma corrente i , dissipa, sob a forma de calor, uma potência $P = 2,0$ W.
- Se a intensidade da corrente for duplicada, quantas vezes maior se tornará a potência dissipada em R ?
 - Então, qual será o novo valor desta potência?
 - Supondo que o valor de i fosse aumentado continuamente, faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $P \times i$.
37. Em um ebulidor são encontradas as seguintes especificações do fabricante: 960 W; 120 V.
- Explique o significado destas especificações (veja o exemplo 2 resolvido nesta seção).
 - Supondo que o ebulidor esteja ligado à voltagem adequada, qual é a corrente que passa através dele?
 - Qual é o valor da resistência elétrica deste ebulidor?
38. Uma pessoa verifica que o chuveiro elétrico de sua residência não está aquecendo suficientemente a água. Sabendo-se que a voltagem V_{AB} aplicada ao chuveiro é constante e lembrando-se da relação $P = iV_{AB}$, responda:
- Para aumentar a potência do chuveiro, a corrente que passa através dele deve ser aumentada ou diminuída?
 - Então, para que haja maior aquecimento da água, a pessoa deverá aumentar ou diminuir a resistência do chuveiro?
 - Assim, quando a chave de um chuveiro é deslocada da indicação inverno para verão, estamos aumentando ou diminuindo sua resistência?
39. Duas resistências, R_1 e R_2 , tais que $R_1 > R_2$, são ligadas em série. Lembre-se da relação $P = Ri^2$ e responda:
- A corrente que passa em R_1 é maior, menor ou igual à corrente em R_2 ?
 - Então, em qual das duas resistências haverá maior dissipação de calor pelo efeito Joule?
40. Considere, agora, as duas resistências do exercício anterior ligadas em paralelo. Lembrando-se da relação $P = iV_{AB}$, responda:
- A voltagem aplicada em R_1 é maior, menor ou igual à voltagem aplicada em R_2 ?
 - A corrente que passa em R_1 é maior, menor ou igual à corrente em R_2 ?
 - Então, em qual das duas resistências haverá maior dissipação de calor pelo efeito Joule?
41. No circuito mostrado na fig. 20-38, o fusível instalado é de 30 A, isto é, ele queima se for percorrido por uma corrente superior a 30 A. Suponha que as correntes que passam nos aparelhos mostrados sejam as seguintes:
- lâmpadas: 2,0 A em cada uma
chuveiro: 25 A
geladeira: 2,5 A
- À medida que aumentamos o número de aparelhos ligados na instalação, a resistência total do circuito aumenta ou diminui?
 - Nestas condições, a corrente que passa no fusível aumenta ou diminui?
 - O fusível queimará se ligarmos apenas o chuveiro e uma das lâmpadas?
 - O fusível queimará se todos os aparelhos forem ligados simultaneamente?
42. Suponha que a diferença de potencial entre os pontos A e B na fig. 20-38 seja $V_{AB} = 120$ V e que o fusível seja de 30 A. Então, qual é o menor valor que pode adquirir a resistência total dos aparelhos ligados sem que o fusível queime?

um tópico especial para você aprender um pouco mais

20.8. Variação da resistência com a temperatura

O VALOR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE UM CONDUTOR DEPENDE DE SUA TEMPERATURA

Na secção 20.3 deste capítulo fizemos um estudo da resistência elétrica dos condutores. Como vimos, esta grandeza mede a oposição que os elétrons encontram ao se deslocar na rede cristalina de um sólido. Na fig. 20-40 procuramos ilustrar este fato, mostrando os elétrons se deslocando no interior de um sólido e realizando colisões com os íons que constituem a rede cristalina deste sólido.

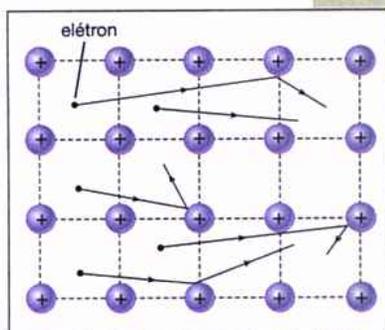


Fig. 20-40: Representação esquemática de elétrons deslocando-se no interior de um sólido cristalino e colidindo com íons da rede.

Naquela secção, analisamos diversos fatores que influenciam o valor da resistência de um fio: seu comprimento, a área de sua secção reta e o material de que ele é feito. Vamos analisar, agora, um outro fator que pode provocar grandes variações na resistência elétrica: a temperatura do condutor.

É um fato experimental, conhecido há bastante tempo, que sendo R_0 a resistência de um condutor a uma temperatura t_0 , sua resistência R , a uma temperatura qualquer t , é dada, com boa aproximação, por

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

onde $\Delta t = t - t_0$ e α é um coeficiente cujo valor depende do material de que é feito o condutor.

A RESISTÊNCIA ELÉTRICA PODE AUMENTAR OU DIMINUIR QUANDO A TEMPERATURA AUMENTA

Medindo os valores de α para um grande número de substâncias, os cientistas verificaram que, para todos os metais, tem-se sempre $\alpha > 0$. Este resultado nos mostra que a resistência elétrica de todos os metais aumenta quando sua temperatura é aumentada. Assim, o filamento de tungstênio de uma lâmpada elétrica comum, que tem uma resistência de aproximadamente 20Ω quando a lâmpada está apagada, apresentará uma resistência de cerca de 250Ω quando ela estiver acesa (temperatura de aproximadamente $2\,500^\circ\text{C}$).

Outras substâncias, como o silício, o germânio, o carbono etc., apresentam valores negativos para o coeficiente α . Portanto, a resistência elétrica destas substâncias diminui quando elas são aquecidas. Nas lâmpadas de filamento de carbono, por exemplo, que eram usadas há alguns anos, observava-se, então, o efeito inverso daquele que ocorre nas lâmpadas de tungstênio: quando acesas, as lâmpadas de carbono apresentavam uma resistência elétrica menor do que quando apagadas.

É interessante observar, ainda, que os cientistas conseguiram obter certas ligas metálicas, como o constantan, para as quais o valor de α é praticamente nulo. Isto significa que a resistência elétrica destas ligas permanece aproxima-

mente constante, mesmo quando suas temperaturas sofrem variações. Por este motivo, tais ligas são usadas na fabricação de resistências de alta precisão (padrões de resistência).

O fato de a resistência elétrica variar com a temperatura encontra algumas aplicações interessantes como, por exemplo, na construção dos termômetros de resistência. Nestes termômetros, obtém-se o valor da temperatura de um ambiente (um forno, por exemplo), medindo-se a resistência elétrica de um fio de platina ali colocado. Isto é possível porque o valor da resistência do fio de platina é conhecido e bem determinado para cada temperatura.

POR QUE A RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS METAIS AUMENTA QUANDO A TEMPERATURA AUMENTA

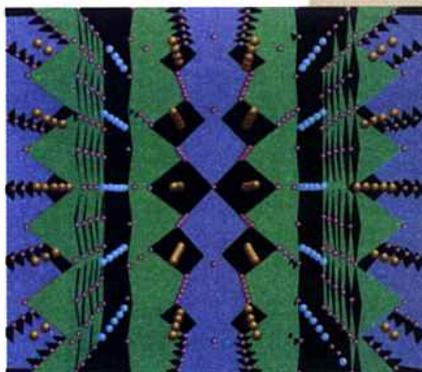
Analisando a estrutura interna dos sólidos é possível entender por que a resistência elétrica destes corpos varia com a temperatura.

Sob o ponto de vista da Física Moderna, a resistência elétrica de um sólido depende basicamente de dois fatores: do número de elétrons livres existentes em sua estrutura e da mobilidade destes elétrons ao se deslocarem através de sua rede cristalina. Evidentemente, quanto maior for o número de elétrons livres (por unidade de volume) existentes no sólido, menor será sua resistência elétrica. Do mesmo modo, esta resistência será tanto menor quanto mais facilmente os elétrons se deslocarem através da rede cristalina, isto é, quanto maior for a mobilidade dos elétrons.

Os cientistas, utilizando recursos experimentais de grande precisão, conseguiram medir o número de elétrons livres em diversas substâncias. Os resultados destas medidas mostram que, nos metais, o número de elétrons livres praticamente não varia quando fazemos variar a temperatura destas substâncias. Entretanto, como sabemos, o aumento de temperatura provoca um aumento na agitação térmica dos elétrons livres e dos íons da rede cristalina. Em virtude disto, ao se deslocarem, os elétrons sofrerão um maior número de colisões contra os íons da rede, isto é, terão sua mobilidade reduzida. Então, nos metais, não havendo um aumento do número de elétrons livres e ocorrendo uma redução na mobilidade destes elétrons, uma elevação de temperatura acarretará, necessariamente, um aumento na resistência elétrica.

POR QUE A RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS SEMICONDUTORES DIMINUI QUANDO A TEMPERATURA AUMENTA

Outras substâncias, ao contrário dos metais, apresentam alterações apreciáveis no número de seus elétrons livres quando sua temperatura é aumentada. Estes materiais apresentam um número relativamente pequeno de elétrons livres quando se encontram em baixas temperaturas. Portanto, nestas condições, eles se comportam praticamente como se fossem materiais isolantes. Quando sua temperatura cresce, o aumento da agitação térmica faz com que um grande número de elétrons se separe de seus átomos, tornando-se elétrons livres. Então, embora a mobilidade dos elétrons se torne menor, um aumento na temperatura provocará uma diminuição na resistência elétrica destes materiais, visto que o número de seus elétrons livres aumenta consideravelmente.



Representação da estrutura interna de um supercondutor. Os elétrons livres que constituem uma corrente elétrica se deslocam, ao longo desta estrutura, sem nenhuma resistência.

Para ilustrar esta afirmação, examinemos o caso do silício puro. À temperatura ambiente, verifica-se que existem cerca de 10^{11} elétrons livres por cm^3 neste material e que sua resistência elétrica é bastante elevada. Se a temperatura do silício for aumentada para $700\text{ }^\circ\text{C}$, o número de elétrons livres que ele apresenta aumenta 10 milhões de vezes, passando a ser de 10^{18} por cm^3 . Como consequência disto, sua resistência elétrica diminui, tornando-se cerca de 1 milhão de vezes menor. Os materiais que apresentam comportamento semelhante são denominados semicondutores (silício, germânio, selênio, Cu_2O , PbS etc.).

O QUE É A SUPERCONDUTIVIDADE

Uma propriedade importante, relacionada com a variação da resistência elétrica com a temperatura, foi descoberta em 1911 pelo físico holandês Kamerlingh Onnes, que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1913 por seus trabalhos no campo das baixas temperaturas. Este cientista verificou que algumas substâncias, a temperaturas muito baixas (próximas de zero absoluto), apresentam resistência elétrica praticamente nula. Em outras palavras, os elétrons livres da substância, nesta situação, podem se deslocar livremente através de sua rede cristalina. Este fenômeno recebeu o nome de *supercondutividade* e, quando o material se encontra neste estado, ele é denominado *supercondutor*. Se uma corrente elétrica for estabelecida em uma espira feita de material supercondutor, esta corrente permanecerá indefinidamente, mesmo que a fonte de tensão que a estabeleceu seja retirada do circuito.

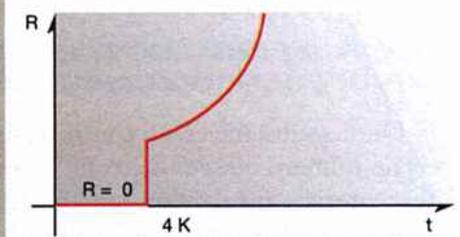
ADS



Kamerlingh Onnes (1853-1926)

Físico holandês que se tornou conhecido pelos seus trabalhos no campo das baixas temperaturas e pela produção de hélio líquido. Influenciado pelos trabalhos de Van der Waals, estudou as propriedades termodinâmicas dos gases e líquidos sob diversas condições de pressão e temperatura. Onnes descobriu a supercondutividade dos materiais, isto é, a redução da resistência elétrica de algumas substâncias, praticamente a zero, quando resfriadas a temperaturas próximas do zero absoluto. Em 1913 ele recebeu o Prêmio Nobel de Física por estes trabalhos.

Fig. 20-41: À temperatura de 4K a resistência elétrica de uma amostra de mercúrio cai bruscamente para zero, permanecendo nula a qualquer temperatura inferior a esta.



A temperatura na qual uma substância se torna supercondutora é denominada temperatura de transição. Esta temperatura varia de um material para outro. Para o mercúrio, por exemplo, ela é igual a 4 K, enquanto, para o chumbo, ela vale cerca de 7 K. O gráfico da fig. 20-41 mostra o que ocorre com a resistência R de uma amostra de mercúrio quando sua temperatura t é reduzida. Observe que R diminui à medida que t diminui e, quando a temperatura de transi-

ção (4 K) é atingida, a resistência da amostra reduz-se bruscamente para zero, permanecendo nula para qualquer temperatura inferior a esta.

OS SUPERCONDUTORES E A TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os materiais supercondutores poderão desempenhar, no futuro, um papel importantíssimo na engenharia elétrica. É um fato conhecido que, nas transmissões de energia elétrica, desde a usina geradora até o centro onde ela é utilizada (cidades, indústrias etc.), há uma perda considerável por efeito Joule em virtude da resistência das linhas transmissoras. Os engenheiros eletricitistas procuram tornar esta perda a menor possível, mas encontram limitações, principalmente tendo em conta a grande extensão destas linhas. Se o material das linhas de transmissão fosse supercondutor, não haveria dissipação por efeito Joule (pois $R = 0$) e, assim, a energia gerada na usina elétrica poderia ser totalmente utilizada nos centros consumidores. Entretanto, na atualidade, é praticamente impossível construir uma linha como essa, pois seria necessário manter os cabos transmissores abaixo de sua temperatura de transição, o que é tecnicamente inviável.

Quando o desenvolvimento tecnológico encontrar uma solução para este problema, a energia que é atualmente dissipada nos cabos transmissores poderá ser totalmente aproveitada; a economia será equivalente à construção de um grande número de novas usinas geradoras de energia elétrica.

Supercondutividade a altas temperaturas

Durante muitos anos, desde a descoberta de Kamerlingh Onnes em 1911, os cientistas se preocuparam em descobrir novas substâncias, que pudessem apresentar supercondutividade a temperaturas mais elevadas do que aquelas com as quais se viam obrigados a trabalhar no início desses estudos. Apesar desses esforços, até o início da década de 80, as temperaturas de transição mais elevadas que conseguiram obter estavam em torno de 25 K. Assim, para tornar supercondutores os fios dos materiais descobertos, eles deveriam ser mantidos imersos em hélio líquido, cujo ponto de ebulição é de apenas 4 K! Esta era a única maneira de manter os fios naquelas baixas temperaturas exigidas para a supercondutividade. A fig. 20-42, por exemplo, obtida na década de 1960, mostra dois recipientes cilíndricos, contendo hélio líquido, nos quais estão mergulhadas duas bobinas de material supercondutor. Os fios dessas bobinas são percorridos por correntes de intensidade muito elevada, sem que haja dissipação de calor, já que sua resistência, nessas condições, é nula (deve-se observar que, se esses fios estivessem à temperatura ambiente, eles se fundiriam se fossem percorridos por correntes tão intensas). Essas bobinas comportam-se, então, como poderosos eletroímãs, que são capazes de orientar grandes pregos de ferro, colocados sobre a mesa (o efeito magnético da corrente será analisado no capítulo 23). Em virtude de o processo de obtenção do hélio líquido ser complexo e apresentar custo elevado, experiências como esta só podiam ser realizadas em laboratórios de pesquisas sofisticados.

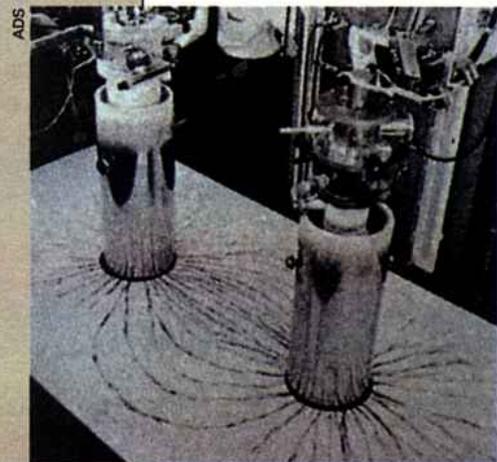


Fig. 20-42: No interior dos cilindros encontram-se bobinas mergulhadas em hélio líquido, tornando-se supercondutores.

Em 1986, uma nova classe de materiais supercondutores foi descoberta: uma *cerâmica*, em cuja composição estão presentes óxidos de cobre, misturados com lantânio ou ítrio, e cuja temperatura de transição é de 125 K. Esta descoberta se apresentou como uma grande surpresa para os cientistas, pois as cerâmicas, de maneira geral, não são boas condutoras de eletricidade.

Os cientistas K. Muller (Suíça) e J. Bednorz (Alemanha)

Receberam o Prêmio Nobel de Física, em 1987, pela descoberta de materiais que se tornam supercondutores a altas temperaturas. Os trabalhos destes físicos foram desenvolvidos nos laboratórios de pesquisa da IBM, em Zurique, na Suíça.

A grande vantagem desta cerâmica é possuir uma temperatura de transição superior à temperatura de ebulição do nitrogênio (78 K). O nitrogênio, além de ser muito abundante, pode ser liquefeito com relativa facilidade, possibilitando manter a cerâmica no estado supercondutor com poucos gastos e com equipamentos acessíveis a laboratórios mais modestos. Por isso, mesmo países em desenvolvimento, como o Brasil, podem dar prosseguimento a pesquisas nesta área. O grande objetivo destas pesquisas, ainda remoto, é obter materiais que apresentem supercondutividade a temperaturas próximas da temperatura ambiente, que possam ser alcançadas pelos processos comuns de refrigeração.

Como vimos, se esse objetivo for alcançado, as perdas nas transmissões de energia elétrica serão anuladas, o que traria um grande aumento (em torno de 30%) de energia elétrica disponível em todo o mundo. Além dessa vantagem, outras aplicações podem ser pensadas para os supercondutores. Uma delas é baseada na propriedade desses materiais de repelirem o pólo de um ímã que deles é aproximado. A fig. 20-43, que mostra um ímã suspenso em equilíbrio (no ar), a uma certa altura acima de uma placa de cerâmica supercondutora, é uma ilustração desta propriedade. Esse efeito poderá ser usado, no futuro, para construção de trens de alta velocidade, nos quais os vagões, providos de fortes ímãs, são mantidos em levitação sobre trilhos supercondutores. No Japão já existe protótipo desse trem, que chega a alcançar velocidade de aproximadamente 530 km/h.

ADS

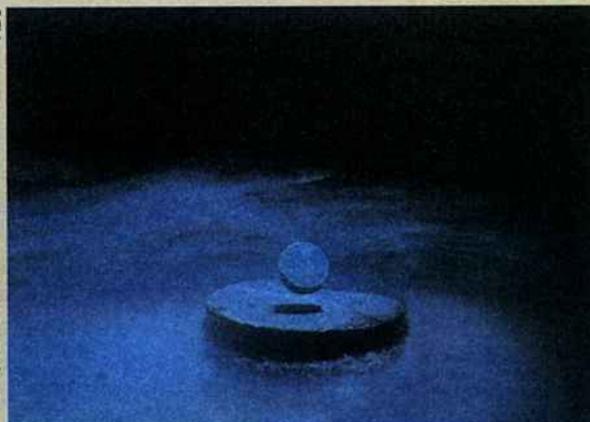


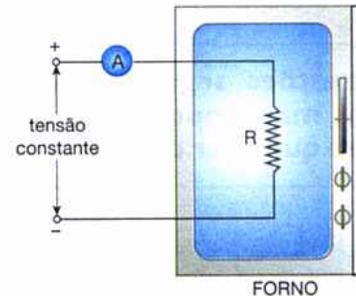
Fig. 20-43: Um pequeno ímã, em forma de disco, levitando sobre um material mantido no estado supercondutor pelo resfriamento propiciado por nitrogênio líquido (envolvendo o material).

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

43. O ebulidor mencionado no exercício de fixação 37, deste capítulo, apresenta as seguintes especificações: 960 W, 120 V. Sua resistência elétrica é, então, de 15Ω (valor obtido na solução do exercício). Uma pessoa, usando uma pilha seca, aplicou uma tensão de 1,5 V a este ebulidor (evidentemente, desligado da tomada) e verificou que, nesta experiência, o ebulidor era percorrido por uma corrente de 0,30 A.
- Qual o valor da resistência do ebulidor que a pessoa encontrou nesta experiência?
 - A que você atribui a diferença entre os valores da resistência obtidos no exercício 37 e na experiência realizada pela pessoa?
44. No texto desta seção foram fornecidos dados sobre o filamento de uma lâmpada de tungstênio acesa e apagada (cerca de 20°C). Usando estes dados, calcule, para o tungstênio, o valor aproximado (com apenas um algarismo) do coeficiente α , também mencionado no texto (coeficiente de variação da resistência com a temperatura).
45. O coeficiente de variação da resistência com a temperatura para a liga metálica constantan, como dissemos, é muito pequeno. Seu valor é $\alpha = 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
- Determine a relação entre os valores de α para o tungstênio e para o constantan (quantas vezes um valor é maior do que o outro).
 - Suponha que a lâmpada mencionada no texto, cuja resistência é de 20Ω quando ela está apagada (cerca de 20°C), tivesse seu filamento feito de constantan. Qual seria a resistência do filamento desta lâmpada se ele pudesse atingir a temperatura de 2500°C ?
46. A lâmpada de tungstênio mencionada no texto é uma lâmpada de 60 W, 120 V. Se seu filamento fosse de constantan, determine a potência que ela dissiparia, ao ser ligada em 120 V, supondo que seu filamento não se queimasse.
47. A temperatura de um forno é obtida por meio de um sistema elétrico, como aquele mostrado na figura deste exercício. A leitura do amperímetro, no momento em que o forno é ligado (20°C), é 2,0 A. O resistor R é feito de um material cujo coeficiente de variação da resistência com a

temperatura é $\alpha = 5,0 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Quando o amperímetro indica 0,50 A, qual é a temperatura do forno?



Exercício 47.

48. Suponha que a temperatura de um filamento metálico, conduzindo uma corrente elétrica, seja aumentada.
- O número de elétrons livres no filamento aumenta, diminui ou permanece praticamente constante?
 - A mobilidade dos elétrons livres, deslocando-se na rede cristalina do metal, aumenta, diminui ou não se altera?
 - Então, a resistência do filamento aumenta, diminui ou não se altera?
49. Uma pequena placa de silício, à temperatura ambiente, ligada a uma pilha seca comum, é percorrida por uma corrente extremamente pequena. Elevando-se a temperatura desta placa, responda:
- O número de elétrons livres na placa aumenta, diminui ou não se altera?
 - A mobilidade dos elétrons livres, deslocando-se na rede cristalina deste semiconductor, aumenta, diminui ou não se altera?
 - O que ocorre com o valor da resistência da placa de silício? Então, dos fatores analisados nas questões (a) e (b), que influenciam na variação da resistência com a temperatura, qual deles predomina para o caso do silício?
50. A temperatura de transição do chumbo é 7,2 K. Então, se um fio de chumbo estiver em temperatura inferior a este valor:
- Qual será o valor de sua resistência elétrica?
 - Como se denomina um material qualquer em condições semelhantes à do chumbo nesta situação?

51. Considere uma usina hidroelétrica, gerando uma potência de 700 000 kW. Esta potência é levada, por uma extensa rede de transmissão, até uma cidade, onde é utilizada.
- Explique por que a potência elétrica que chega à cidade é inferior a 700 000 kW.
 - Qual a potência que chegaria à cidade, se a rede de transmissão fosse feita com cabos supercondutores?
 - Qual a grande dificuldade que existe, na atualidade, para que possam ser instaladas as redes supercondutoras?

isãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Diga com suas palavras o que é uma corrente elétrica.
 - Descreva a corrente elétrica nos metais, nos líquidos e nos gases, dizendo, em cada caso, quais são as cargas livres que se movimentam.
- O que se entende por corrente convencional?
 - Esta corrente tem o mesmo sentido ou sentido contrário ao do campo aplicado no condutor?
- Escreva a equação de definição de intensidade da corrente elétrica, explicando o significado dos símbolos que nela aparecem.
 - No S.I., qual é a unidade de medida da corrente elétrica?
- O que é uma corrente contínua? Dê exemplos de dispositivos que fornecem este tipo de corrente.
 - O que é uma corrente alternada?
 - Qual é o tipo de corrente fornecida pelas companhias elétricas às nossas residências?
 - O que é um retificador?
- O que se entende por pólo negativo e pólo positivo de uma pilha?
 - Faça um desenho mostrando como devemos associar várias pilhas para obter uma voltagem mais elevada.
 - Descreva como é montada uma bateria de automóvel (orientar-se pela fig. 20-10).
- Quando ligamos os pólos de uma bateria por meio de um fio condutor, qual é o sentido da corrente convencional que passa neste fio?
 - Critique a seguinte afirmativa: "uma lâmpada elétrica acesa consome corrente elétrica".
- Escreva a equação que define a resistência elétrica de um condutor, explicando o significado dos símbolos que aparecem nesta equação.
 - Qual é, no S.I., a unidade de medida desta grandeza?
- Qual é a relação entre a resistência elétrica R de um fio e o seu comprimento L ? E entre R e a área A da secção reta deste fio?
 - Escreva a equação que relaciona R com L e A . Como se denomina o coeficiente de proporcionalidade que aparece nesta equação?
 - Um valor elevado da resistividade de um material indica que este material é bom ou mau condutor de eletricidade?
 - O que é um reostato? Descreva como funciona o reostato mostrado na fig. 20-19-a.
- Enuncie com suas palavras a lei de Ohm.
 - A relação $V_{AB} = Ri$ pode ser usada para um material que não obedece à lei de Ohm?
 - Faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $V_{AB} \times i$ para um condutor ôhmico.
- Faça um desenho mostrando três resistências ligadas, em série, entre os pólos de uma bateria.
 - Em qual destas resistências passa a maior corrente?
 - Em qual destas resistências está aplicada a maior voltagem?
 - Como se calcula a resistência equivalente desta associação?
- Faça um desenho mostrando três resistências ligadas, em paralelo, entre os pólos de uma bateria.
 - Em qual destas resistências passa a maior corrente?
 - Em qual destas resistências está aplicada a maior voltagem?
 - Escreva a equação que nos fornece a resistência equivalente desta associação.

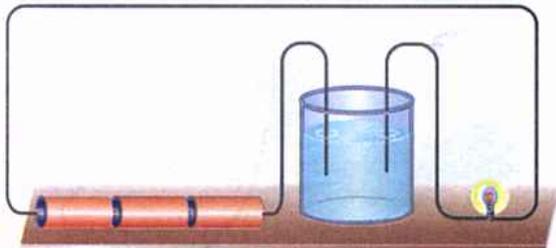
12. a) Faça um desenho mostrando como deve ser ligado um amperímetro para medir a corrente que passa em uma resistência.
 b) Faça um desenho mostrando como deve ser ligado um voltímetro para medir a diferença de potencial nos extremos de uma resistência.
 c) Explique como podemos usar um voltímetro e um amperímetro para medir o valor de uma resistência desconhecida.
13. a) Dê exemplos de aparelhos nos quais a energia elétrica se transforma em outras formas de energia.
- b) Escreva a expressão que nos fornece a potência desenvolvida em um aparelho elétrico, submetido a uma voltagem V_{AB} e percorrido por uma corrente i .
14. a) Explique o que é o efeito Joule.
 b) Escreva a expressão da potência dissipada em um condutor por efeito Joule (em função de R e i).
 c) Cite exemplos de dispositivos ou aparelhos que constituem aplicações do efeito Joule.
 d) O que você entende por curto-circuito?

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

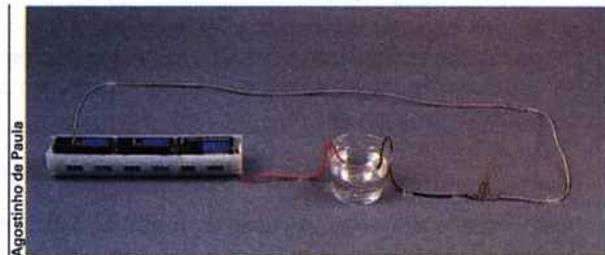
Tome três pilhas secas comuns, uma lâmpada de 3 V (de lanterna) e um recipiente contendo água (de torneira). Usando fios de ligação, faça a montagem mostrada na figura desta experiência (não se esqueça de descascar as extremidades dos fios que estão mergulhados na água).



Primeira experiência.

- 1º) Para se certificar de que as pilhas e as lâmpadas estão em boas condições, feche o circuito encostando, uma na outra, as extremidades mergulhadas na água. Verifique se a lâmpada se acende.
- 2º) Separe as extremidades dos fios, mantendo-as mergulhadas na água, como mostra a figura. A lâmpada se acende?
- 3º) Dissolva uma colher de açúcar na água do recipiente. A lâmpada se acende?
- 4º) Adicione lentamente sal de cozinha à água. O que você observa na lâmpada?
- 5º) Retire as extremidades dos fios de dentro d'água e ligue-as aos extremos de uma pequena barra de grafite (de lápis ou lapiseira, por exemplo). A lâmpada se acende?

Baseando-se em suas observações, responda: a água pura é boa condutora de eletricidade? E a água com açúcar? E a água com sal? E o grafite?



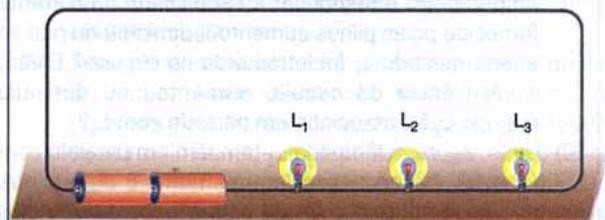
Agostinho de Paula

Segunda experiência

- 1º) Examine o circuito elétrico de uma lanterna comum, observando a disposição das pilhas, como elas estão ligadas à lâmpada e o funcionamento do interruptor. Faça um diagrama mostrando os detalhes do circuito que você observou.
- 2º) Procure, agora, estudar o circuito de um chuveiro elétrico. Observe como as resistências estão ligadas no interior do chuveiro e analise o que ocorre quando a chave é deslocada da posição inverno para verão e vice-versa. Faça um diagrama que represente o circuito observado por você.

Terceira experiência.

Para realizar esta experiência, você vai necessitar de duas pilhas secas comuns, três lâmpadas de lanterna (para 3 V cada uma) e fios de ligação.

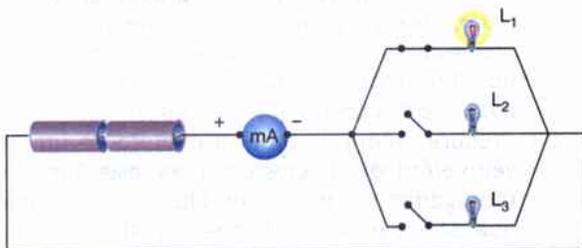


Terceira experiência.

- 1º) Associe as pilhas em série, como mostra a figura desta experiência. Ligue uma das lâmpadas (L_1 apenas) diretamente às pilhas e observe seu brilho.
- 2º) Abra o circuito e introduza uma outra lâmpada, L_2 , em série com L_1 e, fechando novamente o circuito, observe o brilho de ambas as lâmpadas. Tendo em vista suas observações, responda: a corrente fornecida pelas pilhas aumentou, diminuiu ou não se alterou quando a lâmpada L_2 foi introduzida no circuito? Então, a resistência do circuito aumentou ou diminuiu quando a lâmpada L_2 foi associada em série com L_1 ?
- 3º) Introduza, agora, uma terceira lâmpada, L_3 , em série com L_1 e L_2 (veja a figura desta experiência). Observe novamente o brilho das lâmpadas e diga o que aconteceu com o valor da corrente fornecida pelas pilhas e com o valor da resistência total do circuito devido à introdução de L_3 .
- 4º) Desligue a lâmpada L_3 e observe o que ocorre com L_1 e L_2 . Repita sua observação desligando apenas L_2 e, em seguida, apenas L_1 . Então, quando temos vários aparelhos ligados em série, se a corrente em um deles for interrompida, o que acontecerá com a corrente nos demais?

Quarta experiência

Nesta experiência você vai usar as mesmas pilhas e lâmpadas da experiência anterior e, também, um miliamperímetro (se seu colégio não possui este aparelho, talvez você possa consegui-lo, por empréstimo, com um eletricitista ou com um técnico em eletrônica).



Quarta experiência.

- 1º) Monte o circuito mostrado na figura desta experiência (não se esqueça de observar a polaridade do medidor), inicialmente com as lâmpadas L_2 e L_3 desligadas. Anote a leitura do miliamperímetro com a lâmpada L_1 acesa.
- 2º) Ligue a lâmpada L_2 de modo que, no circuito, tenhamos L_1 e L_2 em paralelo. Anote a nova leitura do amperímetro e responda: a intensidade da corrente fornecida pelas pilhas aumentou, diminuiu ou não se alterou quando L_2 foi introduzida no circuito? Então, a resistência do circuito aumentou ou diminuiu quando L_2 foi associada em paralelo com L_1 ?
- 3º) Ligue, agora, a lâmpada L_3 também em paralelo com L_1 e L_2 . Observe o miliamperímetro e diga o que aconteceu com o valor da corrente fornecida pelas pilhas e com a resistência total do circuito quando o

número de lâmpadas ligadas em paralelo foi aumentado.

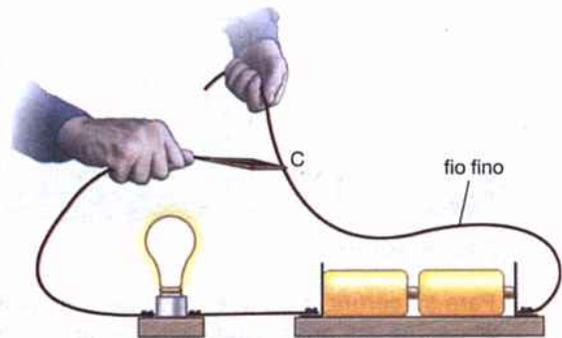
- 4º) Desligue a lâmpada L_3 . As lâmpadas L_1 e L_2 também se apagam? Em seguida, desligue apenas L_2 . As lâmpadas L_1 e L_3 continuam acesas? Repita suas observações desligando apenas L_1 . Você entende, agora, por que é possível desligar, por exemplo, a lâmpada da sala de sua casa sem que as demais lâmpadas se apaguem?

Quinta experiência

Podemos construir um reostato muito simples usando um fio bem fino de níquel-cromo ou de aço, com cerca de 2 m de comprimento (não use fio de cobre, porque a resistividade é muito pequena).

Para verificar se este fio realmente pode funcionar como reostato, monte o circuito mostrado na figura desta experiência (duas pilhas secas, uma lâmpada de lanterna de 3 V e o fio mencionado). Deslize o contato C ao longo do fio fino, para um lado e para o outro. Observe o brilho da lâmpada e responda:

- a) A intensidade da corrente no circuito aumenta ou diminui quando o comprimento do fio é aumentado?
- b) Então, nestas condições, a resistência do circuito aumenta ou diminui?
- c) Suas observações estão de acordo com o que você aprendeu na secção 20.3?



Quinta experiência.

Sexta experiência

- 1º) Examine vários aparelhos eletrodomésticos em sua residência (lâmpadas, geladeira, ferro elétrico, TV etc.) e verifique, entre os dados fornecidos pelos fabricantes, qual é a potência de cada um. Como você já conhece a voltagem das tomadas de sua casa, calcule a intensidade da corrente que passa em cada um desses aparelhos quando eles se encontram em funcionamento (orientar-se pelo exemplo 2, resolvido na secção 20.7).
- 2º) Selecione, entre os aparelhos que você examinou, aqueles que têm seu funcionamento baseado exclusivamente no efeito Joule. Calcule o valor da resistência de cada um desses aparelhos. O aparelho de maior potência possui maior ou menor resistência que os demais? Discuta este resultado.

- 3º) Verifique, na caixa de entrada de eletricidade de sua casa, qual é o valor máximo da corrente que pode passar pela chave automática (ou fusível) sem que ela se desligue. Usando os valores que você calculou na primeira parte desta experiência, indique algumas combinações de aparelhos que, ao serem ligados simultaneamente, fariam com que a chave se desligasse (ou com que o fusível se queimasse).

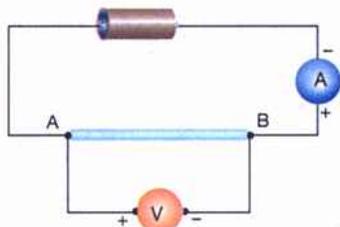
Sétima experiência

Se a potência de um aparelho eletrodoméstico qualquer não for conhecida, você poderá determiná-la facilmente com o seguinte procedimento:

- 1º) Desligue todos os aparelhos elétricos de sua residência (geladeira, aquecedor etc.), deixando acesa apenas uma ou duas lâmpadas de potências conhecidas (60 W ou 100 W).
- 2º) Observe o disco de alumínio do medidor de consumo de energia elétrica, existente na caixa de entrada de eletricidade de sua casa. Meça o tempo que o disco gasta para efetuar um certo número de voltas (5 ou 10 voltas, por exemplo).
- 3º) Apague as lâmpadas e ligue apenas o aparelho de potência desconhecida. Meça, então, o tempo que o disco do medidor gasta para efetuar o mesmo número de voltas.
- 4º) Com os dados que você obteve e a potência das lâmpadas utilizadas, calcule a potência do aparelho.

Oitava experiência

Realizando esta experiência, você poderá verificar se um condutor obedece à lei de Ohm. Você poderá testar isto, por exemplo, para um pedaço de fio de níquel-cromo (ou de aço) que foi usado na quinta experiência deste capítulo.



Oitava experiência.

- 1º) Monte o circuito mostrado na figura desta experiência, onde AB representa o fio mencionado. Como você vai usar uma pilha seca comum (de 1,5 V), o amperímetro e o voltmetro devem ser escolhidos com escalas tais que permitam a leitura da voltagem V_{AB} aplicada ao fio e da corrente que passa através dele. Anote as leituras destes dois medidores e calcule o valor da resistência R do fio AB.
- 2º) Associe outra pilha de 1,5 V em série com a primeira. Anote os novos valores indicados pelo voltmetro e pelo amperímetro. Torne a calcular o valor de R com estes valores.

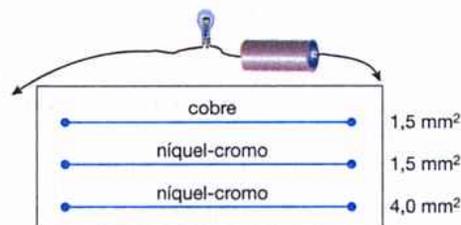
- 3º) Repita suas observações, usando três pilhas secas em série, e calcule novamente o valor de R . Tendo em vista os valores que você obteve, responda:

- a) Ao aplicarmos voltagens diferentes no fio AB, o valor de sua resistência permanece praticamente constante ou sofre variações apreciáveis?
- b) Então, você acha razoável dizer que o fio AB obedece à lei de Ohm?

Nona experiência

Para verificar que a resistência elétrica de um fio metálico depende de seu comprimento L , de sua área A e do material de que ele é feito, realize a seguinte experiência:

- 1º) Tome três fios de mesmo comprimento (aproximadamente 60 cm), sendo dois deles de níquel-cromo, com seções de $1,5 \text{ mm}^2$ e $4,0 \text{ mm}^2$, e o outro de cobre, de seção igual a $1,5 \text{ mm}^2$. Estenda esses fios sobre uma tábua, prendendo-os por suas extremidades, como mostra a figura.

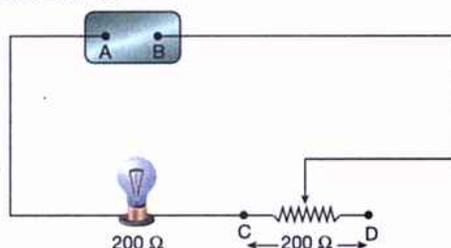


Nona experiência.

- 2º) Ligue uma lâmpada (com soquete) de lanterna (1,5 V ou 3,0 V) a uma ou duas pilhas secas, por meio de fios em cujas extremidades foram adaptados pinos (veja a figura).
- 3º) Encoste os pinos às extremidades do fio de cobre e observe o brilho da lâmpada.
- 4º) Faça a mesma observação ligando, agora, os pinos às extremidades do fio de níquel-cromo, de seção igual à do fio de cobre. O brilho da lâmpada aumentou, diminuiu ou não se alterou? Compare qualitativamente as resistividades do cobre e do níquel-cromo e verifique se sua resposta é confirmada pelos dados da tabela 20-1.
- 5º) Mantendo um dos pinos ligado a uma extremidade do fio de níquel-cromo ($1,5 \text{ mm}^2$), deslize o outro pino ao longo deste fio e observe o brilho da lâmpada à medida que o comprimento do fio diminui. O brilho da lâmpada aumenta ou diminui? Por quê?
- 6º) Transporte os pinos para as extremidades do fio de níquel-cromo de seção igual a $4,0 \text{ mm}^2$ e compare o brilho da lâmpada com aquele observado no 4º item desta experiência (se necessário, para facilitar a comparação, repita este item). Em qual das duas situações o brilho da lâmpada é maior? Explique.

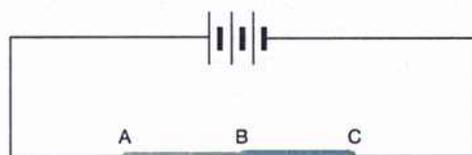
problemas e testes problemas e testes problemas

- Entre os pontos A e B da tomada mostrada na figura deste problema é mantida uma diferença de potencial $V_{AB} = 120 \text{ V}$. Calcule a corrente que passa na lâmpada para as seguintes posições do cursor do reostato:
 - Cursor em C.
 - Cursor no meio de CD.
 - Cursor em D.



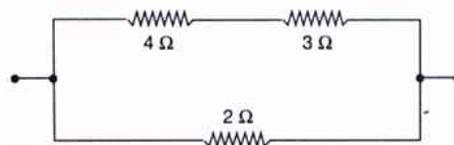
Problema 1.

- Um fio tem 10,0 m de comprimento e $3,0 \text{ mm}^2$ de área da seção reta. Medindo-se a resistência elétrica deste fio, verificou-se que seu valor é $5,7 \times 10^{-2} \Omega$. De que material você julga ser feito este fio?
 - Faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico que representa a resistência elétrica de um fio metálico homogêneo, em função de seu comprimento.
 - O que representa a inclinação deste gráfico?
- Um fio metálico homogêneo, cuja resistência é 150Ω , foi cortado em 10 pedaços iguais. Ajuntando-se os pedaços lado a lado, de modo a formar um feixe, qual será a resistência do condutor assim obtido?
- Os fios AB e BC mostrados na figura deste problema são feitos do mesmo material e têm o mesmo comprimento, mas BC é mais grosso do que AB. Entre as afirmativas seguintes, assinale aquela que está correta:
 - A resistividade de AB é maior do que a de BC.
 - A resistência elétrica de AB é igual à de BC.
 - A corrente elétrica que passa em AB é igual à que passa em BC.
 - A voltagem V_{AB} é menor do que a voltagem V_{BC} .
 - O campo elétrico é nulo no interior dos condutores AB e BC.



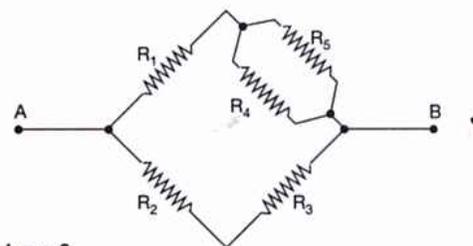
Problema 5.

- Analise a associação de resistências mostrada na figura deste problema. Sem calcular a resistência equivalente desta associação, podemos afirmar que o seu valor:
 - Está compreendido entre 7Ω e 2Ω .
 - É menor do que 2Ω .
 - Está compreendido entre 9Ω e 7Ω .
 - É igual a 9Ω .
 - É maior do que 9Ω .



Problema 6.

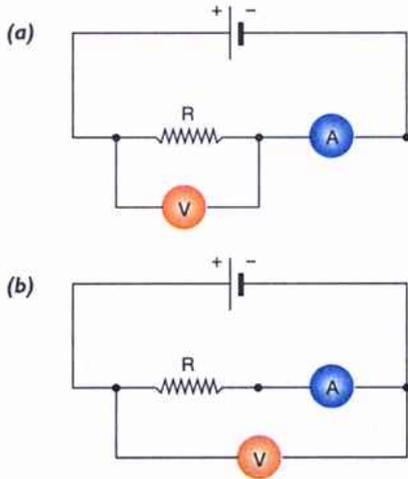
- Considere o circuito elétrico analisado no exercício de fixação 29 deste capítulo.
 - Calcule a voltagem a que está submetida cada uma das resistências do circuito.
 - Qual é o valor da corrente que passa em cada uma dessas resistências?
- Na associação de resistências mostrada na figura deste problema, temos: $R_1 = 3,0 \Omega$ e $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 6,0 \Omega$. A voltagem aplicada entre A e B é de 24 V. Calcule:
 - A resistência equivalente da associação.
 - A corrente total que passa de A para B.
 - A corrente que passa em cada resistência.



Problema 8.

- Para medirmos o valor de uma resistência R desconhecida, com auxílio de um voltímetro e de um amperímetro, podemos usar a montagem (a) ou a montagem (b) mostradas na figura deste problema. Considere, entretanto (ao contrário do que normalmente ocorre), que a resistência interna do amperímetro e a corrente que passa no voltímetro não sejam desprezíveis. Nestas condições, responda:
 - Na montagem (a) a leitura do amperímetro será maior, menor ou igual à corrente que passa em R ?

- b) Então, usando a montagem (a), o valor que obteremos para R será maior, menor ou igual ao seu valor real?
- c) Na montagem (b), a leitura do voltímetro será maior, menor ou igual à voltagem aplicada em R ?
- d) Então, usando a montagem (b), o valor que obteremos para R será maior, menor ou igual ao seu valor real?



Problema 9.

10. Uma lâmpada de filamento comum apresenta as seguintes especificações: 330 W; 220 V. Supondo que esta lâmpada esteja ligada na voltagem especificada, determine:

- a) O valor da corrente que passa em seu filamento;
- b) O valor da resistência deste filamento.

11. Em uma residência, na qual a voltagem é de 120 V, está instalado um fusível de 25 A. Nesta residência são utilizados eventualmente diversos aparelhos eletrodomésticos, nos quais encontra-se especificada a potência de cada um:

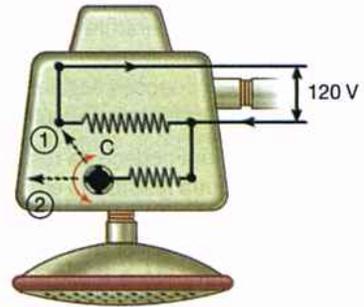
- chuveiro: 2 400 W
- televisão: 120 W
- liqüidificador: 240 W
- ebulidor: 840 W
- lâmpadas: 60 W (cada uma)

O fusível queimar se forem ligados simultaneamente:

- a) O chuveiro, o televisor e o liqüidificador.
- b) O chuveiro e o ebulidor.
- c) O ebulidor, o liqüidificador e o televisor.
- d) 10 lâmpadas, o televisor e o chuveiro.
- e) O ebulidor, o televisor, o liqüidificador e 5 lâmpadas.

12. A figura deste problema representa o circuito utilizado em determinados tipos de chuveiros elétricos. A chave C pode ser deslocada da posição (1) para

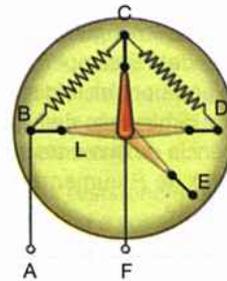
a posição (2) e vice-versa. Para qual posição da chave o chuveiro está no inverno? Explique.



Problema 12.

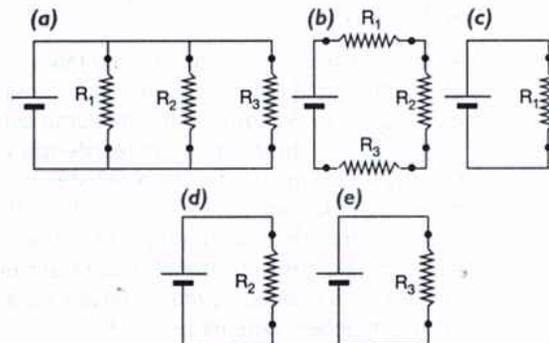
13. Um tipo de chuveiro muito comum apresenta um circuito semelhante ao mostrado na figura deste problema. Entre os pontos A e F é mantida uma voltagem constante e, através da chave L, é possível estabelecer contato nos pontos B, C, D e E. Analise as afirmativas seguintes e indique quais estão corretas:

- a) Com a chave em B, haverá um curto-circuito.
- b) Com a chave em C, o chuveiro estará no inverno.
- c) Com a chave em D, o chuveiro estará no verão.
- d) Com a chave em E, o chuveiro estará desligado.



Problema 13.

14. Para aquecer a água contida em um recipiente, você dispõe de três resistências, R_1 , R_2 e R_3 , e de uma bateria que fornece uma voltagem constante. Entre as montagens mostradas na figura deste problema, assinale aquela que você deveria usar para que a água fosse aquecida rapidamente.



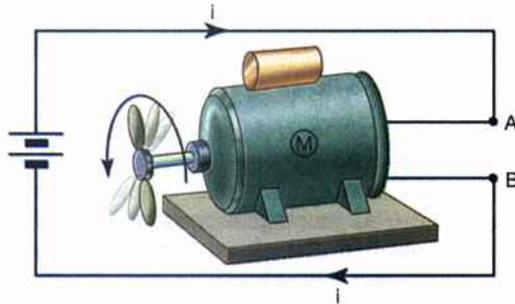
Problema 14.

15. O proprietário de uma cantina verificou que os alimentos colocados no interior de uma estufa elétrica não eram suficientemente aquecidos. Para aumentar a temperatura desta estufa, ele poderá fazer várias modificações na resistência que a aquece. Entre as opções seguintes, assinale aquela que não o levará a obter o resultado desejado:

- Cortar um pedaço da resistência.
- Ligar outra resistência em paralelo com a primeira.
- Ligar outra resistência em série com a primeira.
- Substituir a resistência por outra de mesmo comprimento e mesma seção, feita com um material de menor resistividade.
- Substituir a resistência por outra de mesmo material e mesmo comprimento e de maior área de seção reta.

16. Quando estudamos o efeito Joule, vimos que a potência dissipada em uma resistência R , percorrida por uma corrente i , é dada por $P = Ri^2$. Suponha que o valor de R seja variável e que a voltagem V_{AB} aplicada a ela seja mantida constante. Se o valor de R for aumentado, podemos concluir corretamente que:

- A potência aumentará, porque P é diretamente proporcional a R .
- A corrente i diminuirá, porque V_{AB} permanece constante.
- O valor de P permanecerá constante, porque o aumento de R é compensado pela diminuição de i .
- O valor da potência diminuirá, porque a influência da diminuição de i sobre P é maior do que a influência do aumento de R .
- O valor de P aumentará, porque i permanece constante.



Problema 17.

17. A figura deste problema mostra um motor elétrico M , ligado a uma bateria que lhe aplica uma voltagem $V_{AB} = 12$ V, fornecendo-lhe uma corrente $i = 5,0$ A. O motor possui uma resistência interna $R = 0,20$ Ω . Em virtude desta resistência, parte da energia fornecida ao motor pela bateria é transformada em calor (o motor se aquece), sendo a energia restante transformada em energia mecânica de rotação do motor. Baseando-se nestas informações, determine:

- A potência total desenvolvida no motor.

- A potência dissipada por efeito Joule no interior do motor.
- A potência mecânica de rotação do motor.

18. Um estudante, em cuja casa a voltagem é de 110 V, queria comprar uma lâmpada de 60 W. Na casa de material elétrico, o balconista lhe vendeu uma lâmpada na qual estava escrito: 60 W; 220 V. Quando esta lâmpada for ligada na casa do estudante (suponha constante a resistência do filamento):

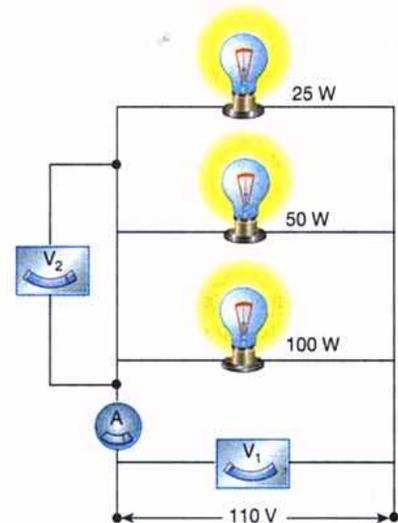
- A corrente que passará através da lâmpada será quantas vezes menor do que se ela estivesse ligada na voltagem adequada?
- Então, qual será a potência dissipada na lâmpada?

19. Uma pessoa que morava em Brasília, onde a voltagem é 220 V, mudou-se para o Rio de Janeiro, onde a voltagem é 110 V. Para que a potência do chuveiro que ele levou na mudança não se altere, que modificação deverá ser feita em sua resistência?

- Reduzir à metade a resistência original.
- Duplicar a resistência original.
- Quadruplicar a resistência original.
- Reduzir à quarta parte a resistência original.
- Não será necessário modificar a resistência original.

20. Analisando o circuito representado na figura deste problema, responda:

- Qual é a leitura do voltímetro V_1 ? E de V_2 ?
- Em qual das lâmpadas passa a maior corrente?
- Retirando-se do circuito a lâmpada de 25 W, a leitura do amperímetro aumenta, diminui ou não se altera? E a resistência total do circuito?



Problema 20.

21. Sabe-se que a resistência elétrica dos materiais geralmente varia com a temperatura. Um filamento metálico, por exemplo, tem resistência tanto maior quanto mais elevada for sua temperatura. Por outro lado, a resistência de um filamento de carbono diminui quando sua temperatura aumenta. Levando em conta estas informações, resolva a seguinte questão: um fabricante de lâmpadas, tomando um filamento cuja resistência à temperatura ambiente é 240Ω , construiu uma lâmpada na qual ele imprimiu a seguinte especificação: 60 W ; 120 V . Esta lâmpada, ao ser ligada na voltagem especificada, dissipará uma potência maior, menor ou igual a 60 W ? Considere que:

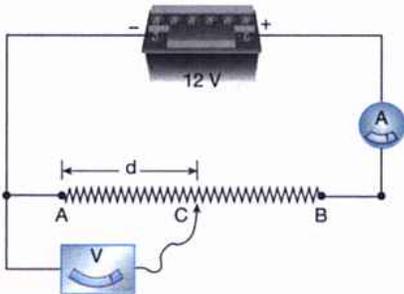
- a) O filamento da lâmpada é metálico.
- b) O filamento da lâmpada é de carbono.

22. Analise o gráfico da fig. 20-21-b e responda:

- a) A resistência do condutor (1) aumenta ou diminui quando a corrente que passa por ele é aumentada?
- b) E a resistência do condutor (2)?

23. No circuito mostrado na figura deste problema, a resistência AB é constituída por um fio uniforme e homogêneo. Considere o cursor C deslocando-se de A até B e seja d a distância de A à ponta do cursor. Faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico que representa:

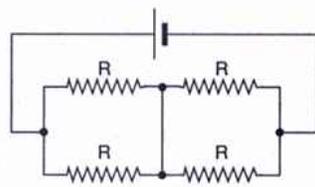
- a) A leitura do voltímetro em função de d .
- b) A leitura do amperímetro em função de d .



Problema 23.

24. Considere a fig. 20-25, que apresenta três resistências ligadas em paralelo. Tendo em vista que, nesta ligação, $i = i_1 + i_2 + i_3$, demonstre que a resistência R , equivalente às resistências associadas, é dada por $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$.

25. Quatro resistências, tendo cada uma um valor R , são associadas em um circuito da maneira mostrada na figura deste problema.



Problema 25.

Determine a resistência equivalente desta associação.

Observação: Quando dois pontos de um circuito são ligados por um fio de resistência desprezível (como no circuito deste problema), eles se mantêm no mesmo potencial e, então, podem ser considerados como se fossem um único ponto do circuito.

26. Um estudante deseja projetar um ebulidor que seja capaz de elevar a temperatura de 1 L de água, inicialmente a 20°C , até o seu ponto de ebulição, em 10 minutos. Suponha que todo o calor desenvolvido no ebulidor seja usado para elevar a temperatura da água.

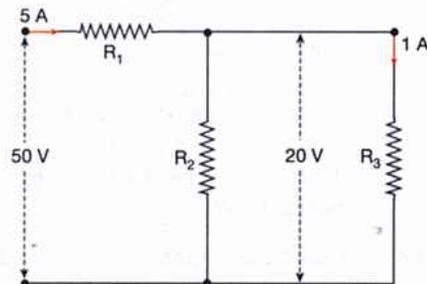
- a) Qual deve ser a potência deste ebulidor (considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$)?
- b) Se o ebulidor for projetado para ser ligado em 120 V , qual deve ser o valor de sua resistência?

27. Em uma tabela encontramos que um comprimento igual a $1\,000$ pés (cerca de 305 m) de um fio de cobre nº 8 tem uma resistência elétrica de $0,63 \Omega$. Qual é a resistência de $1\,000$ pés de um fio de alumínio nº 8 (mesmo diâmetro)?

28. Um motor elétrico puxa uma corrente de 10 A de uma tomada de 220 V , situada a 40 m de distância desse motor. A queda de voltagem nos fios, que fazem a ligação dos terminais do motor com a tomada, não deve ser superior a 3% da voltagem fornecida pela tomada.

- a) Qual a máxima resistência que podem ter os fios de ligação (ida e volta)?
- b) Qual o número do fio de cobre mais fino que pode ser usado nesta ligação? (Consulte a tabela adequada.)
- c) Verifique se a corrente que o motor puxa é inferior à corrente máxima que o fio escolhido pode transportar. (Consulte a tabela adequada.)

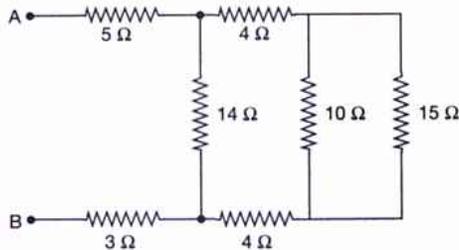
29. No circuito mostrado na figura deste problema, determine os valores das resistências R_1 , R_2 e R_3 .



Problema 29.

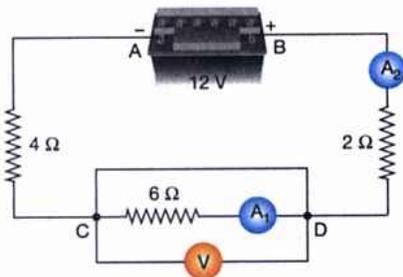
30. Considere o circuito apresentado na figura deste problema.

- Qual é o valor da resistência equivalente deste circuito entre os pontos A e B?
- Se uma voltagem $V_{AB} = 60 \text{ V}$ for aplicada aos pontos A e B, qual será a corrente na resistência de 10Ω ?



Problema 30.

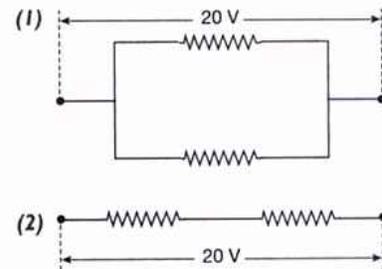
- Um fio cilíndrico de cobre de resistência R é esticado de modo que seu comprimento torna-se duas vezes maior. Supondo que não haja mudança no volume do fio, determine sua resistência após ter sido esticado.
- Na figura deste problema os pontos C e D estão ligados por um fio de resistência desprezível (curto-circuito). Sabendo-se que a bateria aplica ao circuito uma voltagem $V_{AB} = 12 \text{ V}$, qual será a leitura:
 - do amperímetro A_1 ?
 - do voltímetro V?
 - do amperímetro A_2 ?



Problema 32.

- Duas lâmpadas, uma de 60 W , 120 V e outra de 30 W , 120 V , são ligadas em série em uma tomada de 220 V . Supondo que as lâmpadas não se queiem, responda:
 - O brilho que cada uma delas apresenta é maior, menor ou igual ao seu brilho normal (quando submetidas a 120 V , cada uma)?
 - O brilho da primeira é maior, menor ou igual ao da segunda?
- Nos dois esquemas mostrados na figura deste problema, todos os resistores têm o mesmo valor. Sabe-se que no esquema 1 a potência total dissipada é de 60 W . Determine a potência total dissipada no esquema 2.

pada é de 60 W . Determine a potência total dissipada no esquema 2.

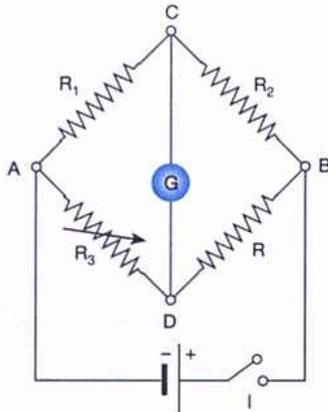


Problema 34.

- A seguinte experiência foi realizada em um laboratório: um fio metálico, fino e comprido, é ligado aos pólos de uma bateria, sendo aquecido pela corrente elétrica até incandescer. Sem se desfazer a ligação, um pedaço do fio é mergulhado na água contida em um recipiente. Observa-se, então, que a parte não mergulhada do fio tem seu brilho consideravelmente aumentado. Explique por que isto ocorre.
- Considere dois chuveiros elétricos, com as seguintes especificações:
 - C_1 : $4\ 200 \text{ W}$, 120 V
 - C_2 : $4\ 200 \text{ W}$, 220 V
 - Qual o número do fio de cobre que deve ser usado nas ligações de cada um dos chuveiros à rede elétrica? (Consulte a tabela adequada.)
 - Qual a voltagem que ofereceu maior vantagem na ligação? Por quê?
- Três lâmpadas elétricas, projetadas para funcionar em 110 V , precisam ser ligadas em uma tomada de 220 V . As potências indicadas nas lâmpadas são: 75 W , 75 W e 150 W . Mostre, em um diagrama, como essas lâmpadas devem ser associadas para que possam ser ligadas à tomada de 220 V , apresentando cada uma seu brilho normal (sem utilizar outros dispositivos, a não ser fios de ligação).
- Uma resistência elétrica desconhecida R pode ser medida, com certa precisão, usando-se o circuito representado na figura deste problema, o qual é denominado ponte de Wheatstone. As resistências R_1 , R_2 , R_3 e R são dispostas da maneira mostrada na figura, e os pontos C e D são ligados através de um galvanômetro G (microamperímetro). Quando a chave I é fechada, todos os ramos do circuito são percorridos por correntes, e o galvanômetro G indica a passagem de corrente em CD. R_1 e R_2 são resistências fixas conhecidas e R_3 é uma resistência variável (reostato ou outro dispositivo). Alterando convenientemente o valor de R_3 , é possível fazer com que a corrente em

CD se anule (o galvanômetro indica zero). Neste momento, dizemos que "a ponte está em equilíbrio" e o valor de R_3 é fornecido pelo dispositivo mencionado. Supondo que a ponte de Wheatstone, apresentada na figura, esteja equilibrada:

- O potencial V_C é maior, menor ou igual ao potencial V_D ?
- Tendo em vista a resposta da questão (a), mostre que $R \cdot R_1 = R_2 \cdot R_3$.
- Supondo que $R_1 = 15 \, \Omega$, $R_2 = 10 \, \Omega$ e que o equilíbrio da ponte ocorreu quando $R_3 = 7,5 \, \Omega$, determine o valor da resistência desconhecida R .

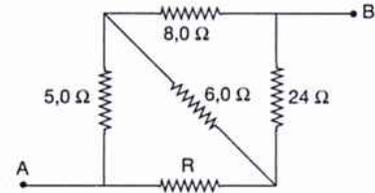


Problema 38.

39. O circuito da figura deste problema é uma ponte de Wheatstone, na qual o galvanômetro foi substituído por uma resistência de $6,0 \, \Omega$. Supondo que a ponte esteja equilibrada:

tituído por uma resistência de $6,0 \, \Omega$. Supondo que a ponte esteja equilibrada:

- Qual é o valor de resistência R ?
- Determine a resistência equivalente do circuito entre os pontos A e B.



Problema 39.

40. Suponha que uma pessoa tenha comprado um grande rolo de fio de cobre capeado, cuja área da seção reta era conhecida, e desejasse verificar se o comprimento do fio correspondia ao valor pelo qual ela pagou.

- Não querendo tomar o trabalho de desenrolar o fio, para fazer a medida diretamente, mostre como a pessoa poderia resolver o problema, se ela dispunha de uma bateria, de um voltímetro e de um amperímetro (faça um desenho ilustrando sua resposta).
- Considerando que a pessoa tenha resolvido o problema satisfatoriamente, qual seria o comprimento do fio, supondo os seguintes resultados por ela obtidos:

seção reta do fio: $A = 2,5 \, \text{mm}^2$
 leitura do voltímetro: $V_{AB} = 6,0 \, \text{V}$
 leitura do amperímetro: $i = 3,0 \, \text{A}$

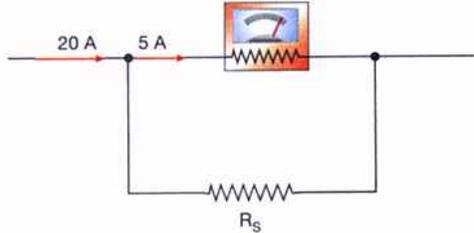
questões de vestibular

questões de vestibular se encontram no final do livro.

problemas suplementares

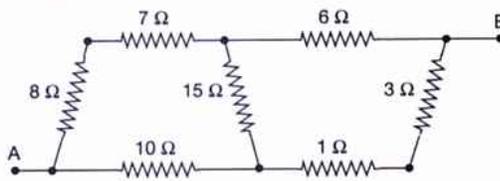
- Suponha que a deflexão máxima do ponteiro de um amperímetro corresponda a uma corrente de $5 \, \text{A}$. Diz-se que o fundo de escala do amperímetro é de $5 \, \text{A}$. Este mesmo amperímetro pode ser usado para medir correntes mais elevadas, ou seja, é possível alterar o valor do seu fundo de escala, por exemplo, para $20 \, \text{A}$, da seguinte maneira: adapta-se, em paralelo com a resistência interna R do amperímetro, uma outra resistência R_s , denominada *shunt* (palavra inglesa que significa "desvio"), como mostra a figura deste problema. O valor de R_s deve ser tal que, quando uma corrente de $20 \, \text{A}$ chega ao aparelho (agora alterado), parte dela é desviada, de modo que em R passem apenas $5 \, \text{A}$ (correspondentes à deflexão total do ponteiro).

- a) Calcule o valor do shunt R_s para esse caso, supondo que $R = 1,5 \Omega$.
- b) Considere o aparelho assim modificado, ligado em um fio, e que sua escala original esteja indicando 3 A. Qual é, então, a corrente i_s do shunt e a corrente total i no fio?



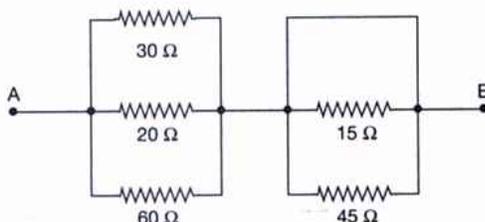
Problema suplementar 1.

2. Um voltímetro, cujo fundo de escala é de 10 V, tem uma resistência interna $R = 2 \times 10^5 \Omega$. É possível modificar o fundo de escala deste aparelho para, por exemplo, 100 V ligando-se, em série com R , uma resistência R' tal que, ao se aplicar 100 V à associação, obtém-se a deflexão total do ponteiro.
 - a) Calcule o valor de R' para este caso.
 - b) Considere o aparelho, assim modificado, sendo usado para medir a voltagem nos pólos de uma bateria. Se a escala original indicar 6 V, qual é a voltagem V' em R' e qual é a voltagem V na bateria?
3. a) Determine a resistência equivalente, entre os pontos A e B, do circuito mostrado na figura deste problema.
 b) Aplicando-se entre os pontos A e B do circuito uma tensão $V_{AB} = 42 \text{ V}$, determine o valor da corrente em cada um dos resistores.



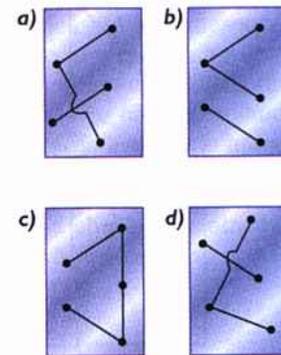
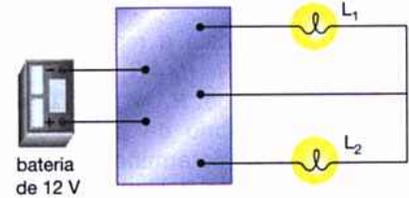
Problema suplementar 3.

4. Ligam-se os pólos de uma bateria aos pontos A e B do circuito mostrado na figura deste problema. Sendo $V_{AB} = 12 \text{ V}$, determine a intensidade da corrente que a bateria fornece ao circuito.



Problema suplementar 4.

5. As duas lâmpadas L_1 e L_2 , mostradas na figura deste problema, funcionam normalmente quando submetidas a uma tensão de 12 V. As figuras seguintes representam modos diferentes de ligação das lâmpadas à bateria, experimentadas por uma pessoa. Em quais delas as lâmpadas funcionaram normalmente?



Problema suplementar 5.

6. a) A partir da equação na qual a resistividade de um condutor foi introduzida no texto deste capítulo, determine no S.I. qual é a unidade desta grandeza (verifique se sua resposta coincide com a unidade apresentada na tabela 20-1).
 b) No estudo de resistência elétrica, costuma-se trabalhar com uma grandeza, denominada condutividade, que é representada pela letra grega σ (sigma). Esta grandeza é definida como sendo o inverso da resistividade: $\sigma = 1/\rho$. Consultando a tabela 20-1, calcule a condutividade do melhor condutor que ali foi apresentado (em sua resposta, apresente a unidade de σ no S.I.).
7. A conta de luz de uma residência apresenta os seguintes dados:

Leitura anterior	Leitura atual	Consumo (kWh)	Importância a pagar
8 283	8 335	52	260,00

Considerando estes dados, quanto custaria a iluminação de uma casa, na qual 10 lâmpadas de 60 W, 120 V permaneceram acesas 4 h por dia, durante 30 dias?

8. Um resistor é constituído de um material cujo coeficiente de variação da resistência com a temperatura é $\alpha = 5,0 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Sendo constante a voltagem entre os terminais deste resistor e sabendo-se que, a 20°C , ele dissipa uma potência de 120 W , determine a potência que ele dissipará à temperatura de 60°C .

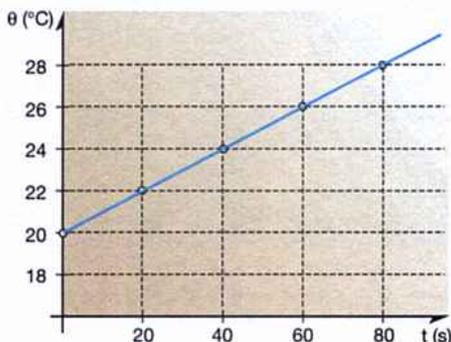
9. A lâmpada do farol de um automóvel, submetida à tensão de 12 V fornecida pela bateria, estava funcionando normalmente. Substituindo a bateria por uma pilha seca de $1,5 \text{ V}$, verificou-se que a lâmpada não se acendeu. Supondo que a resistência do filamento tenha se mantido constante, responda:

- a) Você julga que há corrente no filamento da lâmpada ligada à pilha?
- b) De quantas vezes foi reduzida a potência da lâmpada?

10. A resistência de um aquecedor elétrico é de $12 \text{ } \Omega$. Esse aquecedor é mergulhado em um recipiente contendo $2,0 \text{ L}$ de água a 20°C e ligado a uma tomada de 120 V . Supondo que 75% do calor gerado por efeito Joule seja absorvido pelo líquido, calcule quantos minutos serão necessários para que metade da água do recipiente se evapore. Considere $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$, o calor específico da água igual a $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e o calor de vaporização da água igual a 540 cal/g .

11. Um líquido, de massa $m = 1,0 \text{ kg}$ e calor específico, c , desconhecido, é colocado em um calorímetro de capacidade térmica desprezível. Uma resistência elétrica, mergulhada no líquido, é submetida a uma voltagem $V_{AB} = 12 \text{ V}$, sendo percorrida por uma corrente $i = 5,0 \text{ A}$. Para se obter o valor de c , construiu-se o gráfico apresentado na figura deste problema, o qual mostra a variação da temperatura θ do líquido, em função do tempo t .

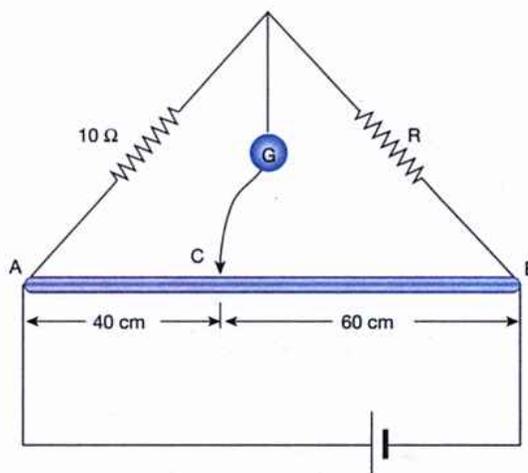
- a) Sendo l a inclinação deste gráfico, obtenha uma expressão para c em função de V, i, m e l .
- b) Calcule o valor de c obtido nesta experiência.



Problema complementar 11.

12. Na ponte de Wheatstone (analisada no problema 38 deste capítulo), duas das resistências conhecidas costumam ser substituídas por um fio homogêneo AB de seção uniforme, como mostra a figura deste problema. Este dispositivo é denominado ponte de corda ou ponte de fio. Esta ponte é equilibrada movendo-se o contato C entre A e B .

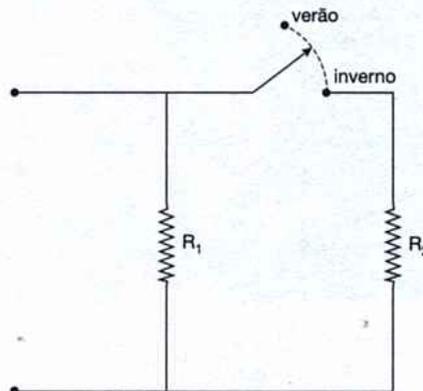
- a) Sendo R_{AC} e R_{CB} as resistências dos trechos $AC = L_1$ e $CB = L_2$, mostre que $R_{CB}/R_{AC} = L_2/L_1$.
- b) Supondo que na posição mostrada na figura a ponte esteja equilibrada, calcule o valor da resistência desconhecida R .



Problema complementar 12.

13. O sistema de aquecimento de um chuveiro elétrico está representado na figura deste problema. Com a chave na posição inverno o chuveiro dissipa $2\,200 \text{ W}$, enquanto, na posição verão, ele dissipa $1\,100 \text{ W}$. A tensão na rede de alimentação é de 110 V . Supondo que os valores das resistências não variem com a temperatura, responda:

- a) Qual o valor da corrente que passa pelo fio de alimentação do chuveiro quando ele é ligado na posição inverno?
- b) Quais são os valores das resistências R_1 e R_2 ?



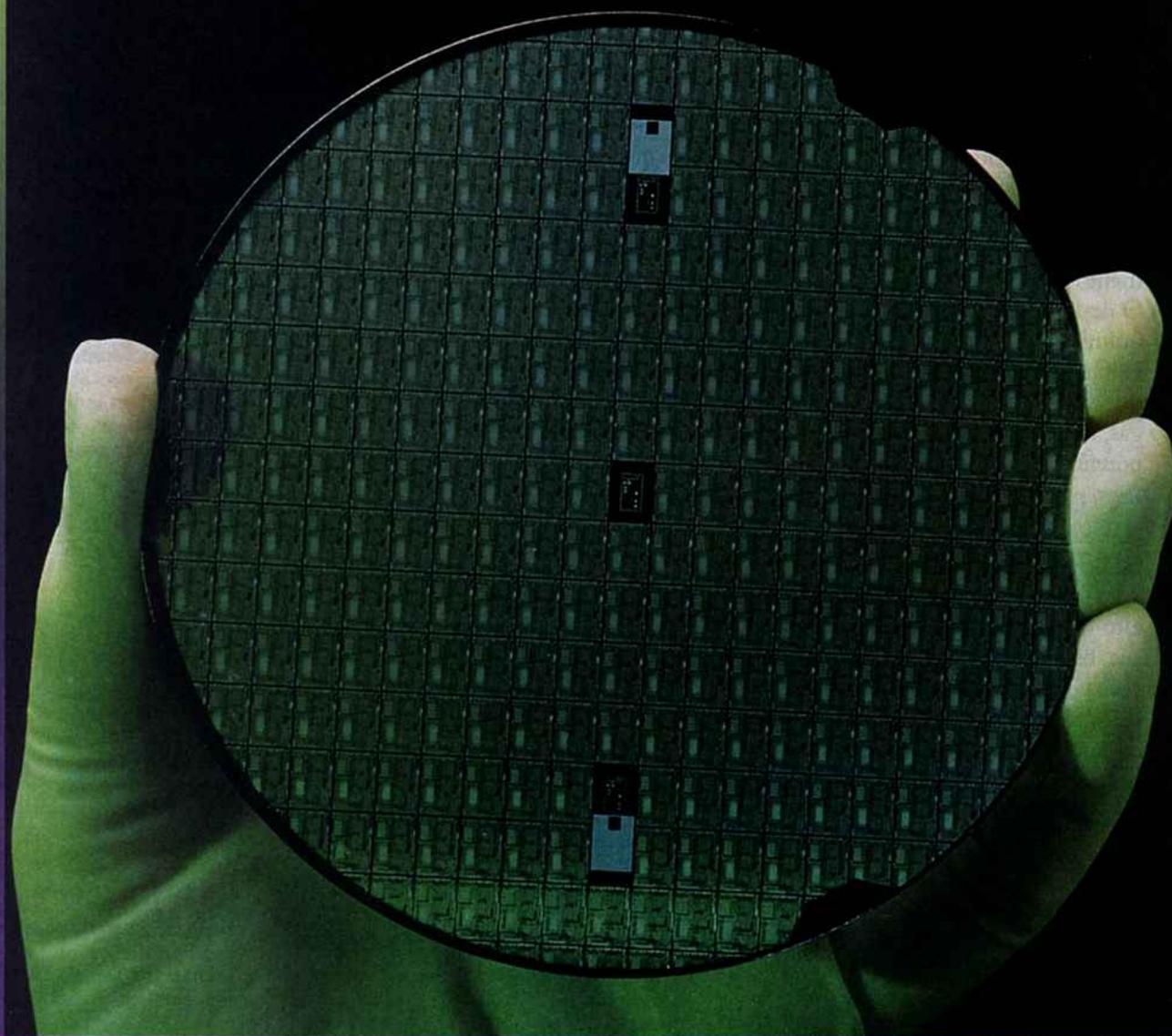
Problema complementar 13.

14. Um engenheiro eletricitista está projetando uma rede de transmissão de energia elétrica com um certo comprimento. Para a instalação desta rede, ele poderá escolher cabos de cobre ou de alumínio. A resistência total da rede deve ser a mesma, qualquer que seja o material usado (para que a dissipação de energia seja a mesma).
- A área da seção reta do cabo de alumínio seria maior ou menor do que a do cabo de cobre? Quantas vezes?
 - O peso do cabo de cobre seria maior ou menor do que o do cabo de alumínio? Quantas vezes? (Considere a densidade do alumínio igual a $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e a do cobre igual a $8,9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.)
 - Considerando a resposta da questão (b), explique por que os engenheiros, normalmente, dão preferência aos cabos de alumínio, em lugar do cobre, na construção de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.
15. A potência elétrica fornecida pela companhia de eletricidade a uma residência, em um certo instante, é de 3 300 W, com uma diferença de potencial de 110 V. Os fios da linha de transmissão da rua para a casa têm uma resistência total de $0,10 \Omega$.
- Calcule a perda de potência nesta linha de transmissão.
 - Responda a questão anterior, supondo que aquela mesma potência fosse fornecida a 220 V.
 - Então, qual é a vantagem de se usar 220 V, em lugar de 110 V, em uma residência?
16. Os automóveis mais antigos usavam, quase exclusivamente, baterias de 6 V para alimentar seu circuito elétrico. Atualmente, praticamente todos os carros usam baterias de 12 V. Explique qual a razão dessa prática, tendo em vista a solução do problema anterior.

capítulo 21

Força **eletromotriz**

- Equação do **circuito**



Adam Hart - Davis/SPL/Stock Photos

Os circuitos elétricos modernos são miniaturizados, sendo possível montar um número muito grande deles em um pequeno dispositivo, denominado chip. A figura mostra uma chapa de silício, na qual estão dispostos vários chips.

21.1. Força eletromotriz

O QUE É UM GERADOR DE FORÇA ELETROMOTRIZ

Já vimos que uma pilha ou uma bateria estabelecem e mantêm uma diferença de potencial entre seus pólos. Na fig. 21-1, por exemplo, temos uma voltagem entre os pontos A e B , que são os pólos positivo e negativo da bateria. Portanto, se ligarmos um motor elétrico M a estes pólos, uma corrente elétrica circulará de A para B , como mostra a figura, fazendo funcionar o motor.

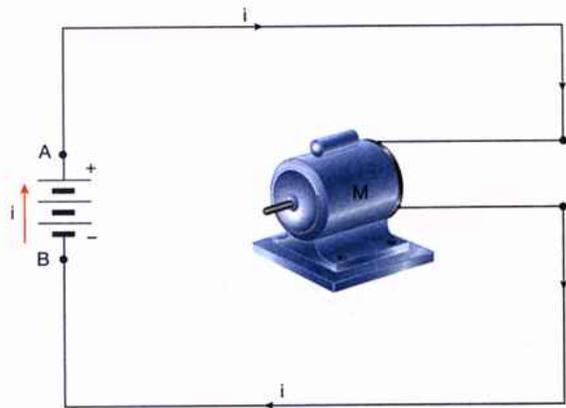


Fig. 21-1: A bateria é um dispositivo que consome energia química para realizar um trabalho sobre as cargas elétricas, elevando o potencial destas cargas. Ilustração esquemática.

No exterior da bateria, as cargas elétricas que constituem a corrente, como sabemos, deslocam-se naturalmente do pólo positivo (potencial maior) para o pólo negativo (potencial menor). Entretanto, ao chegarem em B , para completar o circuito, estas cargas devem ser transportadas no interior da bateria de B para A . Este deslocamento de cargas *não* se faz naturalmente, pois o potencial de B é menor que o de A . O deslocamento de B para A ocorre porque, no interior da bateria, devido a reações químicas, as cargas são forçadas a se deslocar de B para A , completando o circuito e voltando a circular, de A para B , no exterior da bateria. Em outras palavras, a bateria é um dispositivo que, consumindo energia química, realiza um trabalho sobre as cargas, entregando a elas uma certa quantidade de energia (energia elétrica) ao elevar o potencial destas cargas no deslocamento do pólo negativo para o pólo positivo.

O funcionamento de uma bateria pode ser comparado ao de uma bomba d'água. Considerando o circuito hidráulico mostrado na fig. 21-2, sabemos que a água passa naturalmente do alto do edifício (maior energia potencial) para sua base (menor energia potencial), podendo realizar um certo trabalho (mover uma roda d'água, por exemplo). Isto equivale, no caso do circuito da fig. 21-1, ao deslocamento da corrente de A para B , movimentando o motor. Na fig. 21-2, para que a água se desloque de B para A , atingindo o alto do edifício e voltando a circular, é necessária uma bomba d'água. Esta bomba desempenha um papel semelhante ao da bateria, pois realiza um trabalho sobre a água, aumentando sua energia potencial no deslocamento de B para A .

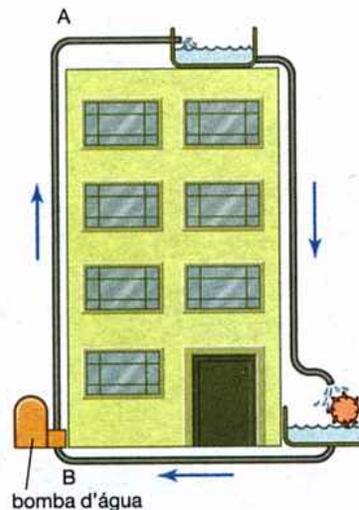


Fig. 21-2: O funcionamento de uma bateria pode ser comparado ao de uma bomba d'água. Ilustração esquemática.

Existem vários outros dispositivos elétricos que, como uma bateria, são capazes de realizar um trabalho sobre as cargas elétricas que passam através deles, aumentando o potencial destas cargas. Tais dispositivos são denominados geradores de corrente ou *geradores de força eletromotriz* (gerador de f.e.m.). Assim, uma pilha (ou uma bateria) é um gerador de f.e.m., pois utiliza energia química, que é

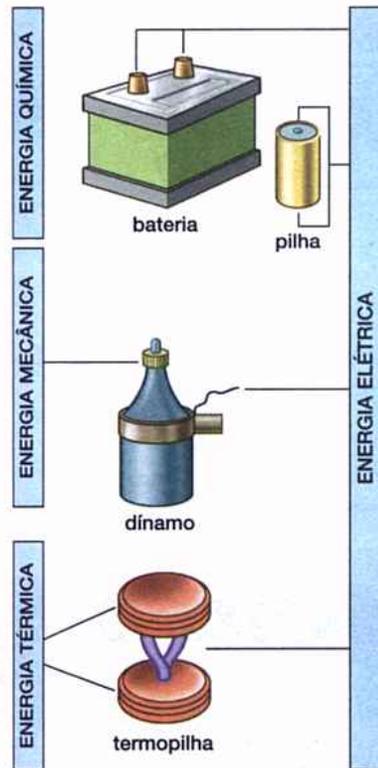


Fig. 21-3: Ilustração esquemática. Nos geradores de força eletromotriz, diversas formas de energia são utilizadas para realizar trabalho sobre as cargas elétricas que passam através deles.

transferida para as cargas sob a forma de energia elétrica. Do mesmo modo, um dínamo, uma termopilha, uma bateria solar etc. são geradores de f.e.m., pois, utilizando outras formas de energia (mecânica, térmica etc.), realizam trabalho sobre as cargas, aumentando sua energia elétrica (fig. 21-3) e sendo, portanto, capazes de gerar uma corrente elétrica.

EXPRESSÃO MATEMÁTICA DA FORÇA ELETROMOTRIZ

Voltando à fig. 21-1, consideremos uma carga Δq sendo transportada de B para A no interior da bateria. Seja ΔT o trabalho que a bateria realiza sobre esta carga, elevando o valor de sua energia potencial elétrica. Em outras palavras, ΔT representa a energia que é transferida à carga Δq pela bateria.

A relação entre estas duas grandezas é denominada *força eletromotriz* (f.e.m.) ou *eletromotância* da bateria, sendo usualmente representada por ϵ . Portanto, temos

$$\epsilon = \frac{\Delta T}{\Delta q}$$

Por meio desta relação, vemos facilmente que a unidade de medida da f.e.m., no S.I., será

$$1 \frac{J}{C} = 1 \text{ volt} = 1 V$$

Então, a unidade de f.e.m. é a mesma usada para a medida de diferença de potencial. Entretanto, os conceitos de voltagem e f.e.m. são diferentes, embora, em certas situações, seus valores possam ser iguais, como veremos na secção 21.3.

Assim, quando dizemos que a f.e.m. de uma bateria vale, por exemplo, $\epsilon = 12 V$ (isto é, $\epsilon = 12 J/C$), significa que esta bateria realiza um trabalho de 12 J sobre cada 1 C que se desloca de seu pólo negativo para seu pólo positivo.

Podemos, então, generalizar:

se um gerador realizar um trabalho ΔT ao transportar uma carga Δq de seu pólo negativo para o seu pólo positivo, a força eletromotriz (ou eletromotância) deste gerador é dada por

$$\epsilon = \frac{\Delta T}{\Delta q}$$

O QUE É UM GERADOR DE FORÇA CONTRA-ELETROMOTRIZ

Quando as cargas elétricas passam através do motor da fig. 21-1, elas *perdem* energia elétrica, que se transforma em energia mecânica, conforme vimos no capítulo anterior. Portanto, um motor elétrico, ao contrário de um gerador de f.e.m., *retira* energia das cargas elétricas e, por este motivo, é denominado um *receptor* ou um *gerador de força contra-eletromotriz* (f.c.e.m.).

De uma maneira geral, qualquer aparelho no qual a energia elétrica se transforma em outro tipo de energia, que não seja a energia térmica, é denominado um gerador de f.c.e.m. (receptor). A transformação de energia elétrica em calor ocorre nas resistências elétricas (efeito Joule), que já estudamos anteriormente.

A definição de f.c.e.m. de um receptor é dada pela mesma expressão que define a f.e.m. de um gerador ($\epsilon = \Delta T / \Delta q$). Deve-se apenas observar que, no caso de um receptor, ΔT representa a energia *retirada* da carga Δq que atravessou o aparelho.

Então, em resumo, temos:

um gerador de f.e.m. transfere energia às cargas que passam através dele, transformando um tipo qualquer de energia em energia elétrica. Um gerador de f.c.e.m. (um receptor) recebe energia das cargas que passam através dele, transformando energia elétrica em outro tipo de energia (exceto energia térmica).

UMA BATERIA RECEBENDO CARGA

O motor elétrico, como vimos, é um gerador de f.c.e.m. Outro exemplo de receptor é uma bateria sendo carregada. Neste caso, a energia elétrica das cargas que passam através da bateria é transformada em energia química, que fica armazenada na própria bateria.

Devemos notar que, quando uma bateria funciona como gerador de corrente, isto é, quando ela está se descarregando, a corrente dentro da bateria passa do pólo negativo para o pólo positivo. Observe que isto ocorre, por exemplo, na bateria da fig. 21-1, que está gerando a corrente que aciona o motor. Para dar carga a uma bateria, ela deve ser ligada a um gerador que faça uma corrente passar, dentro dela, do pólo positivo para o pólo negativo (ao contrário do que acontece quando a bateria está gerando a corrente). Na prática, isto é feito comumente através de um carregador de baterias. Este dispositivo é um gerador que produz corrente contínua quando ligado em uma tomada elétrica comum. Observe, na fig. 21-4, que a corrente fornecida pelo carregador penetra no pólo positivo da bateria, passa através dela e sai pelo pólo negativo.

Portanto, esta bateria está recebendo carga (o reostato na figura é usado simplesmente para controlar a intensidade da corrente). Na fig. 21-5 mostramos o diagrama do circuito da fig. 21-4, onde ϵ representa a f.e.m. do gerador (carregador) e ϵ' , a f.c.e.m. do receptor (bateria recebendo carga).

POTÊNCIA FORNECIDA POR UM GERADOR

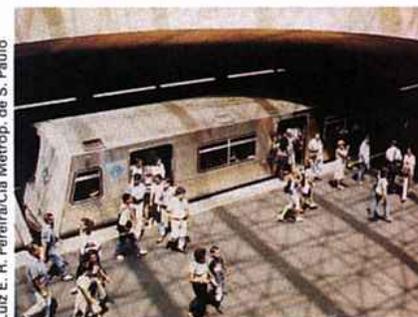
Da expressão $\epsilon = \Delta T / \Delta q$, que define a f.e.m. de um gerador, obtemos $\Delta T = \epsilon \Delta q$.



Laureni Fochetto



Agostinho de Paula



Luiz E. R. Pereira/Cia. Metrop. de S. Paulo

Exemplos de dispositivos que são receptores ou geradores de f.c.e.m., porque são acionados por motores elétricos: uma batadeira de bolo, uma furadeira elétrica e um trem de metrô.

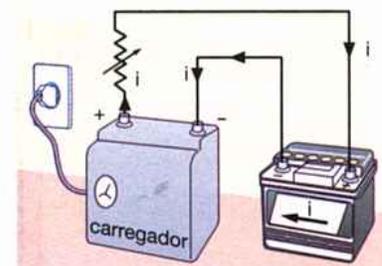


Fig. 21-4: Quando uma bateria está sendo carregada, ela está funcionando como um aparelho de força contraeletromotriz.

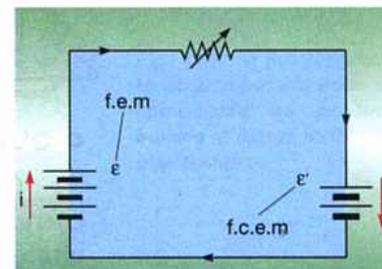


Fig. 21-5: Diagrama do circuito elétrico mostrado na fig. 21-4.

Esta expressão nos fornece o trabalho ΔT realizado por um gerador de f.e.m. ϵ ao transportar uma carga Δq de seu pólo negativo para seu pólo positivo. Dividindo os dois membros desta equação pelo intervalo de tempo Δt , durante o qual o trabalho ΔT foi realizado pelo gerador, temos

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \epsilon \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Como $\Delta T/\Delta t$ é a potência P desenvolvida pelo gerador e $\Delta q/\Delta t$ representa a intensidade da corrente fornecida por ele, vem

$$P = \epsilon i$$

Portanto, a potência desenvolvida por um gerador é obtida multiplicando-se sua f.e.m. pela corrente que ele fornece. Esta mesma expressão nos permite calcular a potência desenvolvida em um receptor. Neste caso, evidentemente, ϵ representa a f.c.e.m. do receptor e i , a corrente que passa através dele.

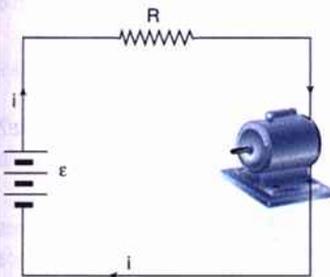


Fig. 21-6: Diagrama para o exemplo da secção 21.1.

Exemplo

No circuito da fig. 21-6, uma bateria de f.e.m. $\epsilon = 12$ V estabelece uma corrente $i = 0,40$ A, que passa através de uma resistência $R = 10 \Omega$ e coloca em movimento um motor cuja f.c.e.m. é $\epsilon' = 8,0$ V.

a) Qual é a energia que a bateria transfere a uma carga $\Delta q = 20$ C que passa através dela?

Esta energia é fornecida pelo trabalho ΔT que a bateria realiza sobre a carga Δq . De $\epsilon = \Delta T/\Delta q$ obtemos

$$\Delta T = \epsilon \Delta q = 12 \times 20 \quad \text{donde} \quad \Delta T = 240 \text{ J}$$

b) Quando a carga $\Delta q = 20$ C passa através do motor, qual é a quantidade de energia elétrica que se transforma em energia mecânica?

Representando por $\Delta T'$ esta quantidade de energia, sabemos que $\epsilon' = \Delta T'/\Delta q$. Logo,

$$\Delta T' = \epsilon' \Delta q = 8,0 \times 20 \quad \text{donde} \quad \Delta T' = 160 \text{ J}$$

c) Baseando-se no Princípio de Conservação da Energia, determine a quantidade de calor ΔQ que é desenvolvida na resistência R quando a carga Δq passa por ela.

A quantidade de energia que a carga Δq recebe na bateria deve ser igual à soma da quantidade de calor desenvolvida em R com a quantidade de energia que esta carga perde ao passar pelo motor. Então,

$$240 = \Delta Q + 160 \quad \text{donde} \quad \Delta Q = 240 - 160 \quad \text{ou} \quad \Delta Q = 80 \text{ J}$$

d) Calcule a potência P desenvolvida pela bateria e a potência P' do motor.

Temos

$$P = \epsilon i = 12 \times 0,40 \quad \text{donde} \quad P = 4,8 \text{ W}$$

$$P' = \epsilon' i = 8,0 \times 0,40 \quad \text{donde} \quad P' = 3,2 \text{ W}$$

e) Determine a potência dissipada, por efeito Joule, na resistência R .

Pela Conservação da Energia, esta potência, P_R , deve ser igual à diferença entre P e P' , isto é,

$$P_R = P - P' = 4,8 - 3,2 \quad \text{donde} \quad P_R = 1,6 \text{ W}$$

Por outro lado, P_R pode também ser obtida pela expressão $P_R = Ri^2$, que estudamos no capítulo anterior. Então,

$$P_R = Ri^2 = 10 \times (0,40)^2 \quad \text{donde} \quad P_R = 1,6 \text{ W}$$

Observe que em ambos os processos obtivemos o mesmo valor de P_R , como não podia deixar de ser.

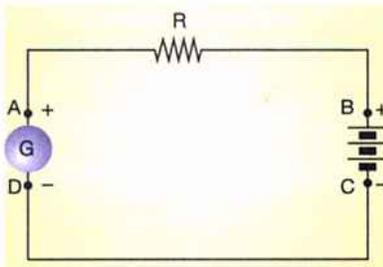
CÍCIOS de fixação **exeRCÍCIOS de fixação** exeRCÍCIOS de fi

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

1. Observando a expressão que define a força eletromotriz de um gerador, diga se esta grandeza é vetorial ou escalar.

As informações seguintes se referem aos exercícios 2, 3, 4 e 5. Como você deve saber, nos automóveis existe um gerador (dínamo) que, acionado pelo motor do carro, produz uma corrente contínua usada para manter a bateria constantemente carregada. A figura deste exercício mostra um gerador deste tipo, G, estabelecendo uma corrente em um circuito onde existe uma resistência R e uma bateria recebendo carga.

2. a) Indique, em uma cópia da figura, o sentido da corrente no circuito.
b) Ao passarem no interior do gerador, as cargas elétricas perdem ou ganham energia?
c) E ao passarem no interior da bateria?



Exercícios 2 a 5.

3. a) No gerador, qual é o tipo de energia que se transforma em energia elétrica?
b) Qual é a transformação de energia que ocorre na bateria?

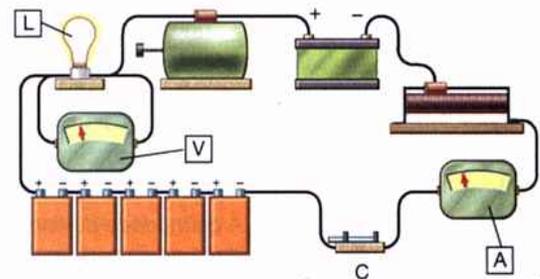
4. Suponha que a f.e.m. do gerador seja $\epsilon = 15 \text{ V}$ e a f.c.e.m. da bateria seja $\epsilon' = 12 \text{ V}$. Considerando uma carga de 1 C passando pelo circuito, responda:

- a) Qual a quantidade de energia que esta carga recebe ao passar no gerador?
b) Qual a quantidade de energia que esta carga perde ao passar na bateria?
c) Qual a quantidade de energia que esta carga perde ao passar pela resistência (lembre-se do Princípio de Conservação da Energia)?

5. Sabe-se que a intensidade da corrente no circuito é $i = 5,0 \text{ A}$. Nestas condições:

- a) Qual é a potência que o gerador fornece às cargas?
b) Qual é a potência que a bateria retira da corrente?
c) Então, qual é a potência dissipada por efeito Joule na resistência?

6. Usando as convenções para representar os diversos elementos que constituem um circuito elétrico, faça um diagrama que corresponda ao circuito desenhado na figura deste exercício.



Exercício 6.

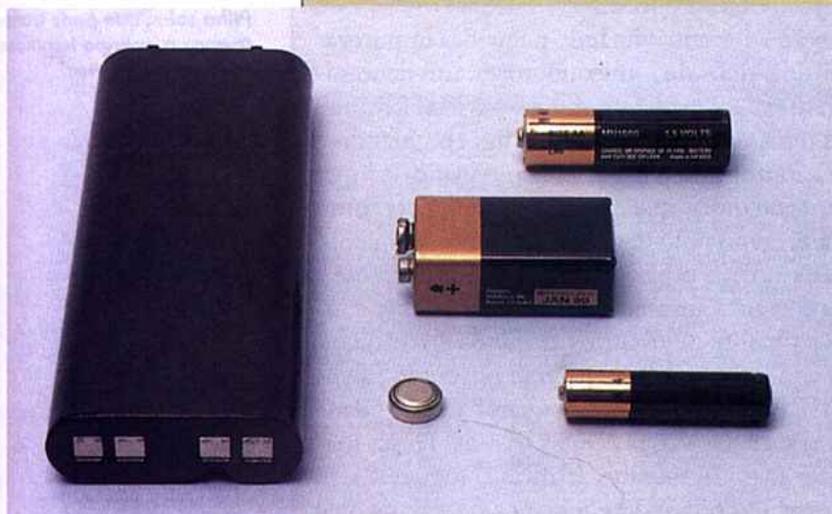
Outros tipos de pilhas ou baterias

Atualmente há um grande interesse em pesquisas para a obtenção de novos tipos de pilhas ou baterias, em virtude do emprego, cada vez maior, destes dispositivos em um número muito grande de aparelhos cujo funcionamento é baseado na energia elétrica. Em circuitos diversos, de relógios, rádios, calculadoras, brinquedos etc., como você deve saber, as pilhas ou baterias são usadas com enorme frequência. Nos circuitos eletrônicos, geralmente miniaturizados, são necessárias pilhas também de pequenas dimensões e em outros usos específicos (automóvel elétrico, aparelhos portáteis de comunicação etc.) são exigidos tipos especiais de baterias, capazes de fornecer correntes de maior intensidade e duração. Assim, grandes esfor-

cos vêm sendo desenvolvidos pela ciência e pela tecnologia modernas para atender essa grande demanda.

De maneira geral, as baterias são classificadas em duas categorias: as *baterias primárias*, que após seu uso por um certo tempo se descarregam e são descartadas, e as *baterias secundárias*, que podem ser recarregadas algumas vezes, o que as torna mais econômicas. Ambas fornecem uma energia de preço muito mais elevado do que aquela que se pode obter nas tomadas de nossas casas, produzida nas grandes usinas e distribuída comercialmente. A energia elétrica obtida por meio de uma pilha primária comum pode custar até cerca de 10 dólares por kWh, enquanto esta mesma quantidade de energia pode ser obtida de uma usina hidroelétrica por apenas 1 centavo de dólar. Apesar disso, a praticidade que as pilhas e baterias propiciam conduz ao seu amplo uso em nosso cotidiano.

Já abordamos, no capítulo anterior, os tipos de baterias mais usados uni-



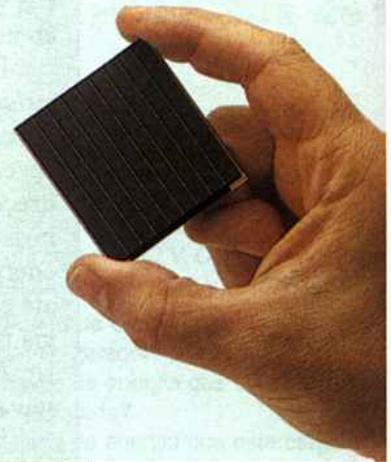
Vários tipos de pilhas muito comuns. Observe a pilha "botão" (que é uma pilha alcalina de mercúrio) e a pilha que fornece uma tensão de 9 V (na realidade, uma associação de 6 pilhas secas).

versalmente: as pilhas secas e as baterias de automóvel, certamente aquelas que são produzidas industrialmente em maior escala em todo o mundo. Muitos outros tipos vêm, entretanto, sendo pesquisados, apresentando características próprias que as tornam adequadas a determinados objetivos. Analisaremos a seguir alguns destes tipos.

- *Pilhas alcalinas:* Nestas pilhas, ao contrário do que ocorre com as pilhas secas de zinco-carbono e com as baterias de chumbo, o eletrólito não é ácido, sendo constituído por um hidróxido (álcali), que apresenta a vantagem de ser menos corrosivo. São encontradas tanto em versão seca, como com eletrólito aquoso. O eletrólito alcalino apresenta geralmente menor resistência elétrica, possibilitando, então, o fornecimento de correntes de maior intensidade por essas pilhas. Um modelo muito difundido, conhecido como bateria de níquel-cádmio, utiliza eletrodos destes materiais, envolvidos em solução de hidróxido de potássio. Sua vantagem é ser bem mais leve e apresentar maior duração do que as baterias de chumbo. Um outro tipo, tendo como eletrodos a prata e o zinco e, ainda, o hidróxido de potássio como eletrólito, é bastante usado por possuir uma elevada relação entre a energia que ela pôde fornecer e o seu peso, ou quando a iluminação que ela deve propiciar é mais importante do que

o custo de energia. As pilhas alcalinas secas de mercúrio, apesar de apresentarem preço elevado em comparação com outros tipos de pilhas secas, são muito empregadas, pois mesmo em versões em forma de pequenos discos (ou botões) são capazes de sustentar correntes elevadas e de grande duração, relativamente ao seu tamanho e peso. São então usadas em aparelhos que requerem estas características, tais como *flashes* e aparelhos corretivos da audição. Recomenda-se não abrir este tipo de pilha, pois o óxido de mercúrio que forma em seu funcionamento é altamente tóxico.

- **Pilhas solares:** A luz solar que chega à terra pode também ser usada para obtenção direta de energia elétrica, por meio de dispositivos denominados *pilhas* ou *baterias solares*. Elas são construídas com materiais semicondutores, como o silício e o germânio, aos quais já nos referimos no Tópico Especial do capítulo anterior (secção 20.8). Conforme veremos na secção 21.4, introduzindo pequenas impurezas nestes materiais é possível obter dois tipos de semicondutores: um denominado tipo *n* e outro denominado tipo *p*. O núcleo da pilha solar é constituído por uma junção *n-p* destes dois tipos de semicondutores (fig. I). Quando a luz solar (ou de qualquer outra fonte) atinge essa junção, verifica-se que ocorre uma separação de cargas, de tal modo que a placa *p* se comporta como o pólo positivo da pilha e a placa *n*, como pólo negativo. Portanto, enquanto houver incidência de luz, este dispositivo é capaz de fornecer uma corrente a um circuito externo. Como esta corrente apresenta geralmente pequena intensidade, a pilha solar é usada para alimentar certos circuitos eletrônicos, cujo funcionamento demanda pequena quantidade de energia, como calculadoras e relógios de pulso (fig. II). Em outros usos, nos quais há necessidade de correntes mais intensas, são associadas várias células básicas. Desta maneira, elas são largamente empregadas em satélites artificiais, foguetes sem tripulação e até mesmo para acionar motores, como mostra a fig. III, na qual vemos baterias solares sendo usadas para acionar uma bomba d'água em Mali, na África Ocidental.
- **Pilhas nucleares:** O funcionamento dessas pilhas tem por base a radioati-



Pilha solar, que pode transformar a energia luminosa em energia elétrica.

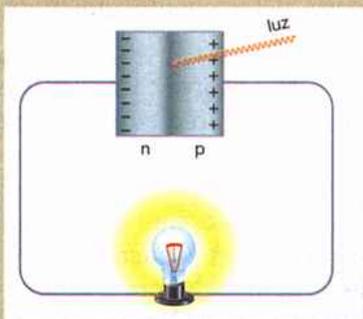


Fig. I: Ilustração esquemática. O constituinte principal de uma pilha solar é uma junção de dois semicondutores *n* e *p*.



Fig. II: As pilhas solares são usadas para o fornecimento de energia elétrica a pequenas calculadoras.



Fig. III: Em locais com grande incidência de luz solar, como é o caso da África, as baterias solares são usadas para acionar até mesmo motores elétricos.

vidade de alguns elementos que emitem elétrons espontaneamente (radiação β , como você provavelmente já ouviu falar). Na fig. IV mostramos como uma pilha nuclear pode funcionar: o cilindro interno,

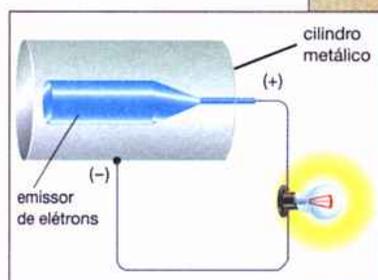


Fig. IV: Esquema de uma pilha nuclear sendo usada para acender uma lâmpada (de baixa potência).

constituído por substância radioativa, emite elétrons, adquirindo portanto carga positiva; os elétrons emitidos são captados pelo cilindro metálico externo, o qual fica negativo. Temos, então, uma pilha elétrica na qual o pólo positivo é o elemento radioativo e o pólo negativo é o cilindro metálico externo. É possível, com esta pilha, obter uma tensão superior a 10 000 V, mas a corrente que ela é capaz de gerar é extremamente pequena (apenas alguns microampères). Até o presente momento, a pilha nuclear não possui nenhum uso prático ou comercial.

Muitos tipos de pilhas e baterias vêm sendo pesquisados com objetivos de comunicação em áreas de difícil acesso, em aplicações militares, vôos espaciais etc., quando o preço da energia não é fator determinante, em virtude da dificuldade de sua obtenção a partir de outras fontes.

21.2. A equação do circuito

RESISTÊNCIA INTERNA

Sabemos que sempre que uma corrente elétrica passa por um condutor, ele oferece uma certa oposição à sua passagem. Em outras palavras, todo condutor possui uma certa *resistência elétrica*. Quando uma corrente elétrica passa através de um motor, por exemplo, ela é obrigada a percorrer vários fios existentes no interior deste motor. Então, estes fios apresentarão uma certa resistência à passagem da corrente, que é denominada *resistência interna* do motor. É por este motivo que, quando um motor está em funcionamento, percebe-se um ligeiro aquecimento do aparelho em virtude do calor gerado por efeito Joule em sua resistência interna.

Do mesmo modo, uma bateria, uma pilha ou outro gerador qualquer oferecem uma certa oposição à passagem da corrente através deles, isto é, estes aparelhos também possuem uma certa resistência interna. Quando uma bateria foi bem construída e possui pouco tempo de uso (bateria nova), sua resistência interna é muito pequena, podendo, geralmente, ser desprezada. Entretanto, à medida que ela vai sendo usada, esta resistência interna aumenta, podendo alcançar valores bastante elevados. Nestas condições, o calor gerado por efeito Joule no interior da bateria torna-se apreciável, fazendo com que ela perca sua utilidade como gerador de corrente.

ANÁLISE DE UM CIRCUITO SÉRIE

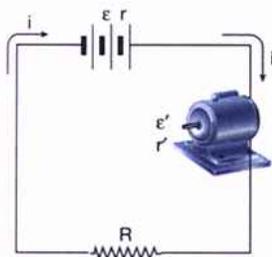


Fig. 21-7: Diagrama de um circuito em série simples.

Consideremos o circuito elétrico mostrado na fig. 21-7, no qual temos uma bateria de f.e.m. ϵ e cuja resistência interna vamos designar por r . Esta bateria está ligada a um motor de f.c.e.m. ϵ' , que apresenta uma resistência interna r' , e a uma resistência externa R (uma lâmpada ou um aquecedor, por exemplo).

Observe que todos os elementos deste circuito estão ligados *em série* entre si, e, por isso, ele é denominado um *circuito série*. Evidentemente, no lugar da bateria poderíamos ter um outro gerador qualquer e ; no lugar do motor, poderia existir um receptor qualquer de f.c.e.m. (uma bateria recebendo carga, por exemplo).

Pela polaridade da bateria, podemos concluir que haverá uma corrente

elétrica passando no circuito no sentido mostrado na fig. 21-7. Então, no interior desta bateria, as cargas elétricas recebem energia ao passarem do pólo negativo para o pólo positivo, isto é, como já sabemos, há transformação da energia química da bateria em energia elétrica das cargas. À medida que estas cargas circulam, transferem esta energia recebida aos diversos elementos que constituem o circuito.

Assim, quando as cargas passam através do motor, parte de sua energia se transforma em energia mecânica de rotação do motor (força contra-eletrómotriz) e parte se transforma em calor, por efeito Joule, em sua resistência interna r' . Na resistência externa R há também transformação de parte da energia das cargas em calor e isto ocorre ainda no interior da própria bateria, em virtude de sua resistência interna r . Em resumo, temos então:

- na bateria* – as cargas recebem energia (energia química se transforma em energia elétrica)
- as cargas perdem energia (energia elétrica se transforma em calor na resistência interna)
- no motor* – as cargas perdem energia (energia elétrica se transforma em energia mecânica)
- as cargas perdem energia (energia elétrica se transforma em calor na resistência interna)
- na resistência R* – as cargas perdem energia (energia elétrica se transforma em calor)

A EQUAÇÃO DO CIRCUITO SÉRIE

A análise que acabamos de fazer do circuito da fig. 21-7 nos permitirá chegar a uma expressão com a qual é possível calcular a intensidade da corrente i que passa por ele. Observando que, em um intervalo de tempo Δt , uma carga Δq passa em qualquer elemento do circuito, é fácil expressar matematicamente as quantidades de energia que a carga Δq ganha ou perde ao longo do circuito. Temos:

- energia recebida na bateria = $\varepsilon \Delta q$
- energia perdida na resistência interna da bateria = $ri^2 \Delta t$
- energia perdida para fazer girar o motor = $\varepsilon' \Delta q$
- energia perdida na resistência interna do motor = $r'i^2 \Delta t$
- energia perdida na resistência R = $Ri^2 \Delta t$

Pelo Princípio de Conservação da Energia, sabemos que a quantidade de energia que a carga ganha na bateria deve ser igual à soma das energias que ela transfere aos elementos do circuito (estamos desprezando a energia perdida nos fios de ligação, pois eles possuem resistência praticamente nula). Podemos, então, escrever:

$$\varepsilon \Delta q = ri^2 \Delta t + \varepsilon' \Delta q + r'i^2 \Delta t + Ri^2 \Delta t$$

Lembrando que, sendo $i = \Delta q / \Delta t$, temos $\Delta q = i \Delta t$ e substituindo esta relação na expressão anterior, virá:

$$\varepsilon i \Delta t = ri^2 \Delta t + \varepsilon' i \Delta t + r'i^2 \Delta t + Ri^2 \Delta t$$

$$\text{donde } \varepsilon = ri + \varepsilon' + r'i + Ri \quad \text{ou} \quad \varepsilon - \varepsilon' = i(r + r' + R)$$

Portanto, obtemos o valor da intensidade da corrente no circuito:

$$i = \frac{\epsilon - \epsilon'}{r + r' + R}$$

Observe que o numerador desta expressão representa a soma algébrica das f.e.m. que aparecem no circuito (considerando negativa a f.c.e.m.) e o denominador, a soma de todas as resistências (internas e externas) deste circuito. Podemos, pois, escrever a relação anterior da seguinte maneira:

$$i = \frac{\Sigma \epsilon}{\Sigma R}$$

De um modo geral, podemos então destacar:

quando em um circuito existem vários geradores de f.e.m., ligados em série a vários receptores (aparelhos que apresentam f.c.e.m.), e a várias resistências elétricas, a intensidade da corrente neste circuito é dada por

$$i = \frac{\Sigma \epsilon}{\Sigma R}$$

onde $\Sigma \epsilon$ representa a soma algébrica das f.e.m. e f.c.e.m. do circuito (sendo estas últimas tomadas com sinal negativo) e ΣR representa a soma de todas as resistências, internas e externas, deste circuito. A equação $i = \frac{\Sigma \epsilon}{\Sigma R}$ é denominada "equação do circuito série".

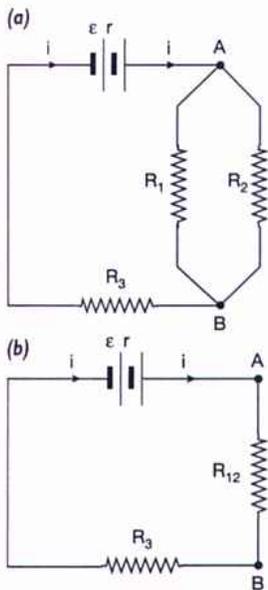


Fig. 21-8: O circuito mostrado em (a) é equivalente ao circuito em série apresentado em (b).

COMENTÁRIOS

1) A equação do circuito é de grande utilidade porque nos permite calcular o valor da corrente que passa em um circuito série, quando conhecemos os valores da f.e.m., f.c.e.m. e resistências existentes neste circuito. Conhecendo o valor de i , podemos facilmente obter os valores de várias outras grandezas envolvidas no circuito, tais como a diferença de potencial entre dois pontos ($V_{AB} = Ri$), a potência desenvolvida por efeito Joule ($P = Ri^2$) etc.

2) A equação $i = \frac{\Sigma \epsilon}{\Sigma R}$ aplica-se apenas aos circuitos de elementos ligados em série. Entretanto, existem certos circuitos, como o da fig. 21-8-a, que, embora possuam resistências dispostas em paralelo, podem facilmente ser reduzidos a um circuito série. Para o circuito da fig. 21-8-a, por exemplo, calcularemos a resistência R_{12} equivalente às resistências R_1 e R_2 e obteremos o circuito série da fig. 21-8-b, que é equivalente ao anterior. Para este circuito da fig. 21-8-b, a equação $i = \frac{\Sigma \epsilon}{\Sigma R}$ pode, evidentemente, ser aplicada.

Exemplo 1

No circuito mostrado na fig. 21-9, temos duas baterias cujas f.e.m. são $\varepsilon_1 = 6,0 \text{ V}$ e $\varepsilon_2 = 24 \text{ V}$ e cujas resistências internas são $r_1 = 1,0 \Omega$ e $r_2 = 2,0 \Omega$. Existe ainda neste circuito uma resistência externa $R = 6,0 \Omega$.

a) Qual é o sentido da corrente que passa no circuito?

De um modo geral, um gerador tende a produzir uma corrente que sai de seu pólo positivo. Então, a bateria ε_1 tende a produzir uma corrente no sentido horário e a bateria ε_2 , no sentido anti-horário. É claro que o sentido da corrente será determinado pela f.e.m. de maior valor. Como $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, teremos, no circuito, uma corrente no sentido anti-horário (como está indicado na fig. 21-9).

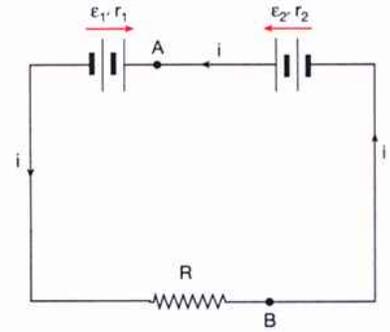


Fig. 21-9: Para o exemplo 1.

b) Qual das duas baterias está funcionando como gerador de corrente? E qual está funcionando como receptor?

Vimos que o sentido da corrente é determinado pela bateria ε_2 , isto é, no seu interior a corrente está passando do pólo negativo para o positivo. Logo, esta bateria é o gerador de f.e.m. do circuito (bateria descarregando).

Observe, então, na fig. 21-9, que no interior da bateria ε_1 a corrente está passando do pólo positivo para o negativo. Sabemos que, nestas condições, ε_1 está recebendo carga, isto é, ela está funcionando como um receptor (gerador de f.c.e.m.).

c) Calcule a intensidade da corrente no circuito.

A intensidade da corrente será dada pela equação do circuito série: $i = \frac{\sum \varepsilon}{\sum R}$. Como ε_2 é uma f.e.m. e ε_1 é uma f.c.e.m., teremos:

$$i = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{R + r_1 + r_2} = \frac{24 - 6,0}{6,0 + 1,0 + 2,0} \quad \text{donde} \quad i = 2,0 \text{ A}$$

d) Verifique se a potência transferida às cargas pelo gerador de f.e.m. é igual à soma das potências que as cargas transferem aos elementos do circuito.

A potência é transferida às cargas pela bateria ε_2 . Esta potência vale:

$$P_2 = \varepsilon_2 i = 24 \times 2,0 \quad \text{donde} \quad P_2 = 48 \text{ W}$$

As cargas transferem uma potência P_1 ao receptor de f.c.e.m. ε_1 e uma potência P_R a todas as resistências do circuito (efeito Joule). Temos:

$$P_1 = \varepsilon_1 i = 6,0 \times 2,0 \quad \text{donde} \quad P_1 = 12 \text{ W}$$

$$P_R = (R + r_1 + r_2) i^2 = (6,0 + 1,0 + 2,0) \times (2,0)^2 \quad \text{donde} \quad P_R = 36 \text{ W}$$

Portanto, $P_2 = P_1 + P_R$, isto é, como não podia deixar de ser, o Princípio de Conservação da Energia foi verificado.

Exemplo 2

Suponha que, no circuito mostrado na fig. 21-8-a, tenhamos os seguintes valores dos elementos aí representados:

$$\varepsilon = 12 \text{ V} \quad r = 1,0 \Omega \quad R_1 = 60 \Omega \quad R_2 = 20 \Omega \quad R_3 = 4,0 \Omega$$

a) Qual é o valor da resistência R_{12} , equivalente às resistências R_1 e R_2 ?

Como R_1 e R_2 estão em paralelo, temos

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{60} + \frac{1}{20}$$

$$\text{ou} \quad \frac{1}{R_{12}} = \frac{1+3}{60} \quad \text{donde} \quad R_{12} = 15 \Omega$$

b) Qual a intensidade da corrente estabelecida pela bateria no circuito?

Como o circuito da fig. 21-8-a é equivalente ao circuito série da fig. 21-8-b, podemos usar a

equação $i = \frac{\Sigma \epsilon}{\Sigma R}$ para obter o valor desta corrente:

$$i = \frac{\Sigma \epsilon}{\Sigma R} = \frac{\epsilon}{R_{12} + R_3 + r} = \frac{12}{15 + 4,0 + 1,0} \quad \text{donde} \quad i = 0,60 \text{ A}$$

O sentido desta corrente está indicado na fig. 21-8-b.

c) Qual é a corrente que passa em R_1 ? E em R_2 ?

Devemos inicialmente determinar a diferença de potencial entre os pontos A e B mostrados na fig. 21-8-a. Isto pode ser feito observando a fig. 21-8-b, na qual temos entre estes pontos a resistência equivalente R_{12} . Então:

$$V_{AB} = R_{12}i = 15 \times 0,60 \quad \text{donde} \quad V_{AB} = 9,0 \text{ V}$$

Voltando à fig. 21-8-a, como já sabemos que $V_{AB} = 9,0 \text{ V}$, podemos calcular as correntes i_1 e i_2 que passam em R_1 e R_2 . Teremos:

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = \frac{9,0}{60} \quad \text{donde} \quad i_1 = 0,15 \text{ A}$$

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{9,0}{20} \quad \text{donde} \quad i_2 = 0,45 \text{ A}$$

Cálculo de diferença de potencial entre dois pontos de um circuito

Suponha que desejássemos calcular a diferença de potencial entre dois pontos A e B de um circuito qualquer (considere, por exemplo, o circuito mostrado na fig. 21-9).

Para obter este valor, devemos imaginar que estivéssemos nos deslocando de A para B, ao longo do circuito, tanto no sentido da corrente, quanto em sentido contrário a ela. Neste deslocamento, ao passarmos por elementos do circuito, o potencial poderá aumentar, diminuir ou não variar, dependendo dos dispositivos que estão presentes no circuito. Poderão ocorrer, então, as seguintes situações:

- 1º) Ao passarmos por um gerador, de seu pólo negativo para o pólo positivo, o potencial aumentará de um valor igual a ϵ . Se a passagem ocorrer em sentido contrário, o potencial diminuirá da mesma quantidade ϵ .
- 2º) Ao passarmos por uma resistência R (inclusive pela resistência interna do gerador), no mesmo sentido da corrente i , o potencial diminuirá de um valor Ri . Se a passagem ocorrer em sentido contrário, o potencial aumentará da mesma quantidade Ri .
- 3º) Ao passarmos por um fio de resistência desprezível (fio de ligação), não haverá variação do potencial.

O valor da diferença de potencial entre dois pontos quaisquer, A e B, será obtido somando-se algebricamente ao potencial de A (V_A) as variações de potencial que ocorrem no percurso de A para B, tomando-se os aumentos com sinal positivo e as diminuições com sinal negativo e igualando-se esta soma ao potencial de B (V_B). O exemplo seguinte ilustrará este procedimento.

Exemplo

Na fig. 21-9, vamos percorrer o circuito de A para B, inicialmente no sentido da corrente. Teremos as seguintes variações do potencial:

- na bateria ε_1 , o potencial *diminui* de $\varepsilon_1 = 6,0 \text{ V}$
- na resistência interna r_1 (da bateria), o potencial *diminui* de $r_1 i = 1,0 \times 2,0$ ou $r_1 i = 2,0 \text{ V}$
- na resistência R , o potencial *diminui* de $Ri = 6,0 \times 2,0$ ou $Ri = 12 \text{ V}$

Podemos, portanto, escrever:

$$V_A - 6,0 - 2,0 - 12 = V_B$$

donde obtemos

$$V_A - V_B = 20 \text{ V}$$

Alternativamente, poderemos percorrer o circuito de A para B em sentido contrário ao da corrente e, evidentemente, o mesmo resultado para o valor de $V_A - V_B$ será obtido. Teremos:

- na bateria ε_2 , o potencial *diminui* de $\varepsilon_2 = 24 \text{ V}$
- na resistência interna r_2 , o potencial *aumenta* de $r_2 i = 2,0 \times 2,0$ ou $r_2 i = 4,0 \text{ V}$.

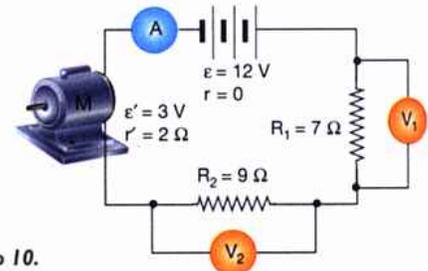
$$\text{Logo } V_A - 24 + 4,0 = V_B \quad \text{ou} \quad V_A - V_B = 20 \text{ V}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

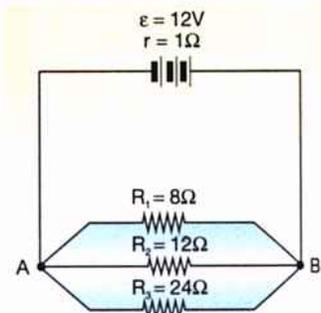
7. Uma bateria, cuja f.e.m. é $\varepsilon = 6,0 \text{ V}$ e cuja resistência interna vale $r = 0,20 \Omega$, está ligada a uma lâmpada, fornecendo-lhe uma corrente $i = 5,0 \text{ A}$.
 - a) Qual é a potência que a bateria transfere às cargas que passam através dela?
 - b) Qual é a potência dissipada por efeito Joule no interior da bateria?
 - c) Então, qual é a potência que a bateria está fornecendo à lâmpada?
8. Uma bateria de f.e.m. ε tem resistência interna desprezível e está ligada a uma resistência externa R . Examinando a equação do circuito, dizer se a corrente fornecida pela bateria aumenta, diminui ou não se modifica se:
 - a) Uma resistência R' for ligada em série com R .
 - b) Uma resistência R' for ligada em paralelo com R .
9. A f.e.m. de uma bateria vale 12 V e sua resistência interna é igual a $0,50 \Omega$.
 - a) Qual o valor da resistência R que deve ser ligada aos pólos desta bateria para que a intensidade da corrente fornecida por ela seja a maior possível?
 - b) Qual é o valor desta máxima corrente que a bateria é capaz de fornecer?
10. A figura deste exercício mostra um circuito no qual uma bateria está ligada em série com duas resistências R_1 e R_2 e com um motor elétrico M . Observando os valores indicados na figura, determine:
 - a) A leitura do amperímetro.

b) As leituras de cada um dos voltmíetros.



Exercício 10.

11. Observe o circuito mostrado na figura deste exercício e determine:
 - a) A resistência R equivalente à associação de R_1 , R_2 e R_3 (faça um desenho do circuito série correspondente ao circuito apresentado).
 - b) A intensidade da corrente fornecida pela bateria.
 - c) A diferença de potencial entre os pontos A e B.
 - d) As correntes i_1 , i_2 e i_3 que passam nas resistências R_1 , R_2 e R_3 .



Exercício 11.

21.3. Voltagem nos terminais de um gerador

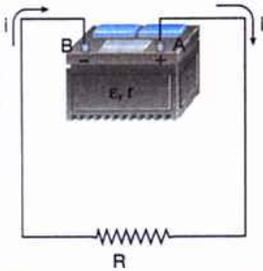


Fig. 21-10: A voltagem V_{AB} nos pólos da bateria é dada pela expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$, onde r é a resistência interna da bateria e ε sua f.e.m.

Consideremos um gerador qualquer, de f.e.m. ε e resistência interna r como, por exemplo, a bateria mostrada na fig. 21-10. Ligando-se este gerador a um circuito externo (uma resistência R , por exemplo), ele fará passar no circuito uma corrente i . Dissemos, no capítulo anterior, que esta corrente é estabelecida porque existe uma diferença de potencial entre os pólos (ou terminais) do gerador.

No circuito mostrado na fig. 21-10, a bateria estabelece uma voltagem V_{AB} entre seus pólos (o pólo positivo A e o pólo negativo B), isto é, V_{AB} representa a voltagem que a bateria aplica no circuito externo. Nestas condições, sabemos que o gerador transfere ao circuito externo uma potência, cuja expressão é $P = iV_{AB}$.

Algumas pessoas costumam confundir os conceitos de f.e.m. e diferença de potencial, acreditando que a voltagem V_{AB} , existente entre os pólos de um gerador, é sempre igual à sua f.e.m. ε . Entretanto, isto não é verdade, como veremos na análise a seguir.

EXPRESSÃO DA VOLTAGEM ENTRE OS PÓLOS DE UM GERADOR

Procuraremos obter uma expressão que relacione a voltagem V_{AB} entre os pólos de um gerador com sua f.e.m. ε .

Sabemos que as cargas elétricas que passam no interior da bateria, deslocando-se do pólo negativo B para o pólo positivo A (fig. 21-10), recebem, em virtude da f.e.m. do gerador, uma potência εi . Entretanto, em consequência da resistência interna, parte desta potência é dissipada, por efeito Joule, no interior do próprio gerador. Esta potência dissipada é expressa, como sabemos, por ri^2 . Portanto, a potência disponível, que será entregue pelo gerador ao circuito externo, será igual à diferença $\varepsilon i - ri^2$. Mas a potência transferida ao circuito externo é também dada por iV_{AB} . Então, teremos:

$$iV_{AB} = \varepsilon i - ri^2 \quad \text{donde} \quad \boxed{V_{AB} = \varepsilon - ri}$$

Observando esta expressão, vemos que a voltagem nos pólos de um gerador nem sempre é igual ao valor de sua f.e.m. Em virtude da potência dissipada no interior do gerador, na expressão de V_{AB} aparece o termo ri , tornando o valor da voltagem *menor* do que a f.e.m. do gerador.

COMENTÁRIOS

- 1) Verifica-se que, nas baterias e pilhas, o valor da f.e.m. é uma característica do aparelho, dependendo apenas dos elementos químicos que entram em sua composição. Uma pilha seca comum, por exemplo, possui uma f.e.m. cujo valor é $\varepsilon = 1,5$ V, quer ela esteja nova, quer já tenha sido usada durante um tempo qualquer. Com o uso prolongado, o que se observa é um aumento na resistência interna r da pilha ou da bateria. A relação $V_{AB} = \varepsilon - ri$ nos mostra, então, que a voltagem V_{AB} diminui e, portanto, a potência que a pilha ou bateria é ca-

paz de fornecer ao circuito externo também diminui, apesar de sua f.e.m. não ter se modificado.

- 2) Se um gerador não estiver fornecendo corrente, isto é, se seus pólos não estiverem ligados por um condutor, nós dizemos que ele está em circuito aberto. Então, sendo $i = 0$, a expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$ nos mostra que, nesta situação, teremos:

$$V_{AB} = \varepsilon$$

Portanto, neste caso particular, a voltagem entre os pólos de um gerador é igual ao valor de sua f.e.m.

Uma maneira simples, usada na prática, para se medir a f.e.m. de um gerador, é baseada neste fato. Quando ligamos apenas um voltímetro diretamente aos terminais de um gerador (fig. 21-11), sua leitura nos fornece o valor de V_{AB} . Entretanto, como a resistência do voltímetro é muito grande, a corrente fornecida pelo gerador será praticamente nula. Então, teremos $V_{AB} = \varepsilon$, ou seja, a leitura do voltímetro nos fornece diretamente a f.e.m. do gerador.

- 3) Já dissemos que, quando uma pilha ou bateria está nova, sua resistência interna é muito pequena, podendo-se considerar $r = 0$. A expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$ nos mostra que, também neste caso, teremos

$$V_{AB} = \varepsilon$$

Portanto, uma bateria nova ($r = 0$) mantém constante a voltagem entre seus pólos (igual a ε), mesmo que ela esteja fornecendo correntes muito intensas ao circuito.

- 4) Vimos que, após um certo tempo de uso, a resistência interna da bateria adquire um valor que não pode mais ser desprezado. Neste caso, a voltagem V_{AB} entre os pólos da bateria será tanto menor quanto maior for a corrente que ela estiver fornecendo ao circuito (conforme se percebe pela relação $V_{AB} = \varepsilon - ri$). O gráfico $V_{AB} \times i$ terá o aspecto mostrado na fig. 21-12. No exemplo discutido a seguir você encontrará uma análise desta situação.

Exemplo

Em um laboratório, uma bateria foi ligada a um reostato, como mostra a fig. 21-13. Um voltímetro, ligado entre os pólos A e B, fornecia o valor da voltagem V_{AB} entre estes pólos e um amperímetro permitia determinar o valor da corrente i fornecida pela bateria. Diminuindo-se gradativamente a resistência externa por meio do reostato, o amperímetro acusava um aumento em i , enquanto o voltímetro mostrava que V_{AB} diminuía. A tabela seguinte apresenta alguns valores de i e V_{AB} obtidos desta maneira:

i (A)	0	2,0	4,0	6,0	8,0
V_{AB} (V)	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0

- a) Desenhe o gráfico $V_{AB} \times i$ para esta bateria.

Usando os dados da tabela, construímos o gráfico mostrado na fig. 21-14. Observe que sua forma é semelhante ao gráfico da fig. 21-12, mostrando que V_{AB} diminui linearmente à medida que aumenta a corrente fornecida pela bateria.

- b) Qual é o valor da f.e.m. da bateria?

Sabemos que a f.e.m. ε de uma bateria é igual ao valor da voltagem V_{AB} entre seus pólos quando a bateria não está fornecendo corrente (circuito aberto). Pelo gráfico, ou pela tabela, vemos claramente que, quando $i = 0$, temos $V_{AB} = 6,0$ V. Logo, $\varepsilon = 6,0$ V.

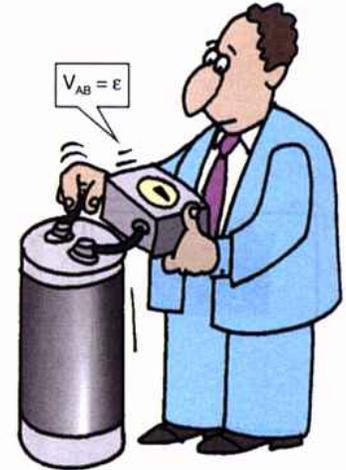


Fig. 21-11: Quando um voltímetro de grande resistência é ligado aos pólos de uma bateria, sua leitura V_{AB} é igual à f.e.m. da bateria.

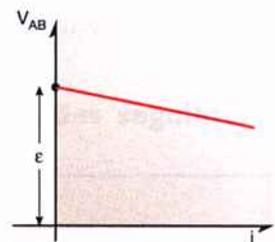


Fig. 21-12: Gráfico $V_{AB} \times i$ para uma bateria de resistência interna não-desprezível.

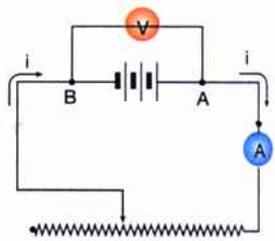


Fig. 21-13: Diagrama para o exemplo da seção 21.3.

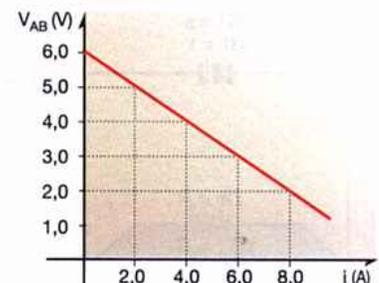


Fig. 21-14: Gráfico para o exemplo da seção 21.3.

c) Qual é o valor da resistência interna da bateria?

Pela tabela vemos, por exemplo, que quando $i = 8,0 \text{ A}$, temos $V_{AB} = 2,0 \text{ V}$. Lembrando que $\epsilon = 6,0 \text{ V}$ e substituindo estes valores em $V_{AB} = \epsilon - ri$, virá:

$$2,0 = 6,0 - r \times 8,0 \quad \text{donde} \quad r = 0,50 \Omega$$

Evidentemente, este mesmo resultado seria obtido qualquer que fosse o par de valores de i e V_{AB} que usássemos na expressão $V_{AB} = \epsilon - ri$.

Is de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

12. Uma pilha de lanterna possui uma f.e.m. $\epsilon = 1,5 \text{ V}$ e sua resistência interna vale $r = 0,1 \Omega$.

- Qual é a voltagem entre os pólos desta pilha quando ela se encontra em circuito aberto?
- Qual é a voltagem entre os pólos desta pilha se ela estiver fornecendo uma corrente de $2,0 \text{ A}$ a uma lâmpada?
- Ligando-se à pilha uma lâmpada de menor resistência, ela passa a fornecer uma corrente de $4,0 \text{ A}$ a esta lâmpada. Qual é, neste caso, a voltagem entre os pólos da pilha?

13. a) Usando os valores obtidos no exercício anterior, construa o gráfico da voltagem entre os pólos da pilha em função da corrente que ela fornece.

- Faça um desenho mostrando como seria o aspecto do gráfico da questão (a) se a resistência interna da pilha fosse nula.

14. Uma lâmpada ligada a uma pilha apresentava uma certa intensidade luminosa. Verificou-se, com o decorrer do tempo, que a intensidade da lâmpada diminuiu gradualmente. Baseando-se nesta informação, diga se cada uma das seguintes grandezas aumentou, diminuiu ou não se alterou com o decorrer do tempo:

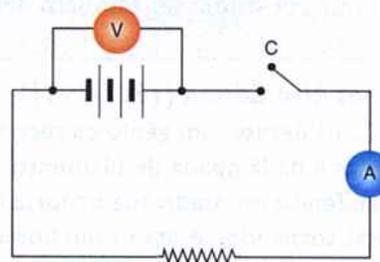
- A f.e.m. da pilha.
- A resistência interna da pilha.
- A voltagem que a pilha aplicava à lâmpada.
- A corrente que a pilha fornecia à lâmpada.

15. No exemplo resolvido no final desta seção, encontramos que a resistência interna da bateria valia $r = 0,50 \Omega$ para os valores $i = 8,0 \text{ A}$ e $V_{AB} = 2,0 \text{ V}$ obtidos da tabela.

- Escolha, na tabela, outro par de valores de i e V_{AB} e calcule a resistência interna da bateria usando estes valores que você escolheu.
- Sua resposta da questão (a) coincide com o valor de r encontrado no exemplo?

16. No circuito mostrado na figura deste exercício, verifica-se que quando a chave C está aberta, a leitura do voltímetro é $4,5 \text{ V}$. Ligando-se a chave C , o amperímetro indica $1,5 \text{ A}$ e o voltímetro passa a indicar $4,2 \text{ V}$. A partir destes dados, determine:

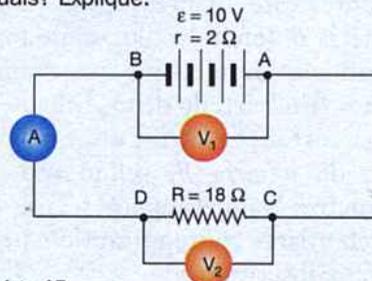
- A f.e.m. da bateria.
- A resistência interna da bateria.



Exercício 16.

17. Considere o circuito apresentado na figura deste exercício.

- Usando a equação do circuito, determine a leitura do amperímetro.
- Usando a expressão que fornece a voltagem nos terminais de um gerador, determine a leitura do voltímetro V_1 .
- Usando a expressão que fornece a voltagem nos extremos de uma resistência, determine a leitura do voltímetro V_2 .
- Você esperava que as leituras de V_1 e V_2 fossem iguais? Explique.



Exercício 17.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

21.4. A válvula eletrônica e o transistor

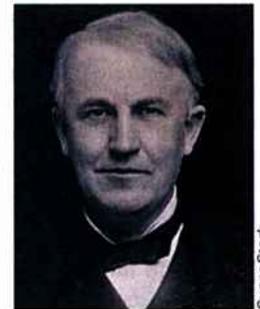
O QUE É O EFEITO TERMOIÔNICO

Os elétrons livres em um corpo metálico possuem, a qualquer temperatura, um movimento desordenado em virtude de sua agitação térmica (de modo semelhante ao que ocorre com as moléculas de um gás). Nesta agitação constante, os elétrons que atingem a superfície do metal são atraídos pelos íons positivos da rede cristalina e, à temperatura ambiente, não possuem energia suficiente para vencer esta atração, permanecendo, assim, no corpo do metal. Entretanto, se a temperatura do corpo for aumentada, a agitação térmica dos elétrons aumentará e um grande número deles conseguirá escapar da atração dos íons positivos. Estes elétrons que escapam do material passam a formar uma nuvem eletrônica próxima à superfície do corpo.

Este fenômeno de emissão de elétrons pela superfície de um metal aquecido é denominado *emissão termoiônica* e foi observado, pela primeira vez, pelo inventor americano Thomas Edison. Por este motivo, a emissão termoiônica costuma ser também denominada *efeito Edison*.

Thomas Alva Edison (1847-1931)

Considerado um gênio da tecnologia, registrou cerca de mil patentes, entre elas a da lâmpada de filamento, a do fonógrafo e a de um projetor de cinema. Tendo montado sua própria indústria, conseguiu economizar um bom capital, tornando-se, assim, um homem rico. Em 1876 abandonou a fábrica, estabelecendo-se em um laboratório de pesquisas industriais. Foi aí que ele criou suas mais importantes invenções. Em 1883, tentando aperfeiçoar a lâmpada de filamento, descobriu acidentalmente o efeito Edison que está descrito neste Tópico Especial.



Super Stock

Na fig. 21-15 apresentamos a montagem com a qual Edison, por acaso, detectou o fenômeno da emissão termoiônica. Uma placa metálica havia sido introduzida na parte superior de uma lâmpada elétrica comum, situando-se em frente ao filamento metálico, como mostra a figura. A placa foi ligada ao pólo positivo de uma bateria *B* e o filamento, ao pólo negativo desta bateria. Como sabemos atualmente, este filamento, ao ser aquecido pela bateria *B'* (efeito Joule), emitia uma grande quantidade de elétrons que eram atraídos pela placa. Em virtude disto, Edison observou que uma corrente elétrica era estabelecida no circuito da bateria *B*, sendo indicada pelo amperímetro. Naquela época, nem Edison nem outros cientistas conseguiram uma explicação para o fato observado.

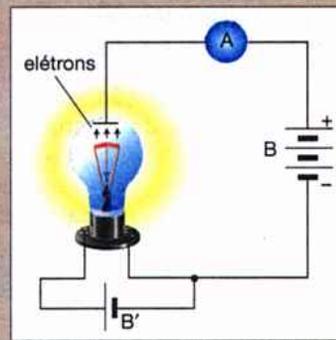


Fig. 21-15: Diagrama da montagem com a qual Edison detectou o efeito termoiônico.

A VÁLVULA DIODO

O efeito termoiônico encontra a sua mais importante aplicação na construção das *válvulas eletrônicas*, usadas amplamente, como você já deve ter visto, em aparelhos de rádio, TV etc.

A mais simples das válvulas é denominada *diodo* (o nome indica que ela possui dois eletrodos) e nada mais é do que uma adaptação da lâmpada com a qual Edison descobriu o efeito termoiônico. A fig. 21-16 representa esquematicamente uma válvula diodo.

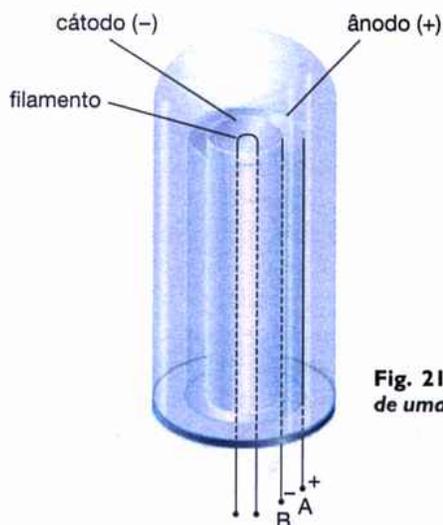


Fig. 21-16: Esquema de uma válvula diodo.

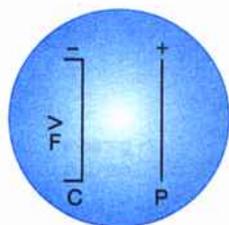


Fig. 21-17: Nos diagramas de circuito elétrico o diodo é representado da maneira mostrada na figura.

Ela consiste em um cilindro metálico (o catodo, isto é, o eletrodo negativo), que é aquecido por meio de um filamento em seu interior, no qual passa uma corrente elétrica (observe, na figura, os dois pinos aos quais se aplica a voltagem que fornece a corrente ao filamento). Este cilindro é envolvido por outro, também metálico, que constitui o anodo da válvula (eletrodo positivo). Aplicando-se uma voltagem aos pinos *A* e *B* mostrados na fig. 21-16, os elétrons que são emitidos, em virtude do efeito termoiônico, pelo catodo aquecido, dirigem-se para o anodo. É necessário que seja feito o vácuo no interior da válvula para permitir este deslocamento dos elétrons. A fig. 21-17 mostra como uma válvula diodo é representada nos diagramas de circuitos elétricos: *F* é o filamento, *C* é o catodo e *P* é a placa (ou anodo).

O DIODO USADO COMO RETIFICADOR DE CORRENTE ALTERNADA

As válvulas diodo, desde a sua invenção, passaram a ser amplamente empregadas em circuitos eletrônicos porque é possível, com elas, retificar uma corrente alternada. Em outras palavras, as válvulas diodo transformam uma corrente alternada em corrente contínua. Para entender por que elas são capazes de produzir este efeito, consideremos a fig. 21-18. Na fig. 21-18-a vemos um circuito no qual a placa P de um diodo foi ligada ao pólo positivo de uma bateria e o catodo, C , ao pólo negativo. Nestas condições, os elétrons emitidos pelo catodo aquecido são atraídos pela placa e, então, uma corrente elétrica se estabelece no circuito, sendo acusada pelo amperímetro. Considere, entretanto, que a ligação tenha sido feita da maneira mostrada na fig. 21-18-b: P ligada ao pólo negativo e C ao pólo positivo da bateria. Nesta ligação, a bateria tende a estabelecer uma corrente de sentido contrário ao da fig. 21-18-a. Mas, nessas condições, os elétrons emitidos por C (que continua a ser aquecido) são repelidos por P , não havendo, portanto, passagem de corrente elétrica entre C e P ; logo o amperímetro não acusa corrente no circuito. Portanto, a válvula diodo só permite a passagem de corrente através dela quando P está em um potencial mais alto que o de C . Em outras palavras, o diodo só permite a passagem de corrente em um determinado sentido, impedindo que a corrente passe em sentido contrário.

Suponha, agora, que um gerador de corrente alternada esteja ligado a uma resistência R , como mostra a fig. 21-19-a.

A intensidade da corrente que passa em R varia de acordo com o gráfico mostrado na fig. 21-19-b, mudando periodicamente de sentido, ou seja, a corrente passa através de R ora em um sentido, ora em sentido contrário. Se uma válvula diodo for introduzida no circuito, da maneira mostrada na fig. 21-20-a, ela só permitirá a passagem da corrente no sentido indicado, impedindo que ela circule no sentido contrário. Desta maneira, a intensidade da corrente, depois da introdução da válvula diodo, variará de acordo com o gráfico da fig. 21-20-b.

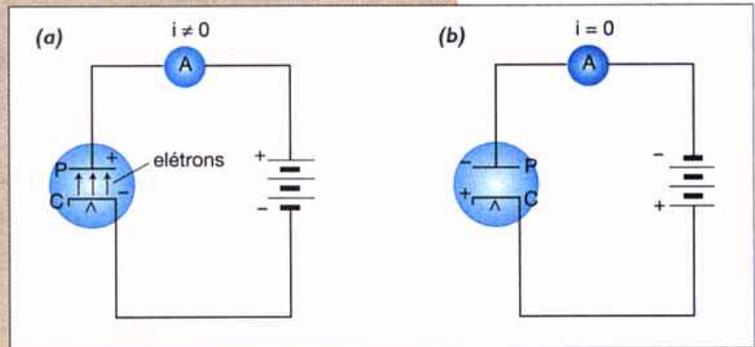


Fig. 21-18: No circuito da figura (a) há passagem da corrente elétrica, mas no circuito da figura (b) temos $i = 0$.

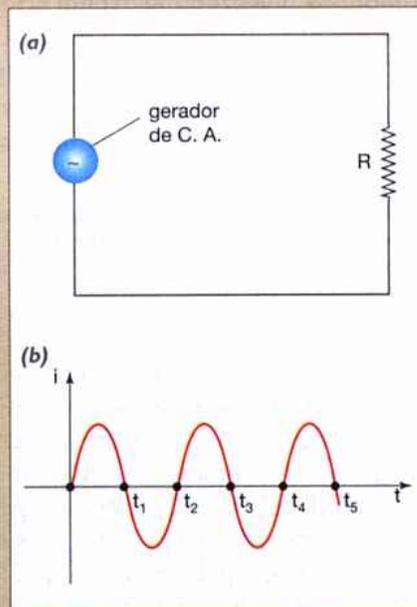


Fig. 21-19: Esquema de gerador de corrente alternada ligado a uma resistência (a) e gráfico mostrando a variação da intensidade da corrente que passa no circuito com o tempo (b).

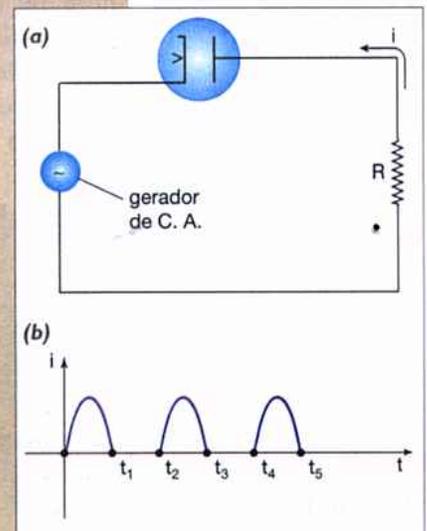
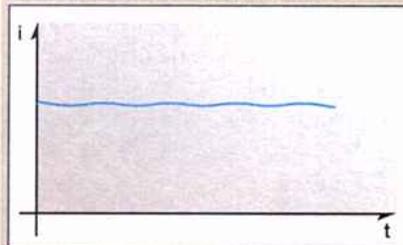


Fig. 21-20: Esquema de gerador de corrente alternada ligado a um circuito contendo uma resistência e um diodo (a). A intensidade da corrente, no circuito, varia com o tempo da maneira mostrada no gráfico em (b).

Fig. 21-21: É possível associar à válvula diodo certos dispositivos (capacitores) de modo a obter, no circuito do gerador de corrente alternada, uma corrente de intensidade praticamente constante. Observe o gráfico.



Observe que esta corrente é interrompida periodicamente (pulsante) e é retificada, isto é, ela está passando no circuito sempre no mesmo sentido. Apesar de retificada, ela ainda não é uma corrente contínua (constante), como aquela fornecida por pilhas ou baterias. Entretanto, é possível associar à válvula diodo certos dispositivos (capacitores), de modo a obter, no circuito, uma corrente retificada cuja intensidade é praticamente constante, apresentando apenas pequenas flutuações no decorrer do tempo, como aquela mostrada na fig. 21-21.

positivos (capacitores), de modo a obter, no circuito, uma corrente retificada cuja intensidade é praticamente constante, apresentando apenas pequenas flutuações no decorrer do tempo, como aquela mostrada na fig. 21-21.

OUTROS TIPOS DE VÁLVULAS

Com o desenvolvimento da eletrônica, surgiram, além do diodo, diversos tipos de válvulas, destinadas a desempenhar as mais variadas funções. Na fig. 21-22 mostramos duas destas válvulas, as quais têm grande utilidade em aparelhos que encontramos freqüentemente em nossa vida diária.

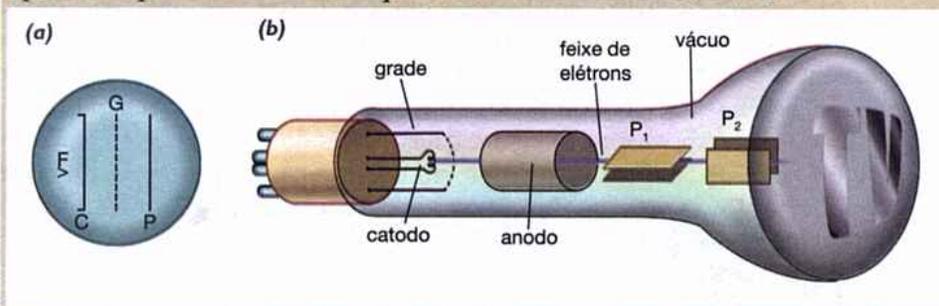


Fig. 21-22: Ilustração esquemática de válvula amplificadora triodo (a) e válvula que constitui o tubo de TV (b).

Na fig. 21-22-a vemos uma válvula, que é denominada triodo (porque tem três eletrodos). Observe que ela nada mais é do que um diodo no qual foi introduzido um terceiro eletrodo, denominado *grade*, indicado por *G* na figura e geralmente constituído por uma rede metálica. Esta válvula tem a finalidade de amplificar sinais elétricos, isto é, com o triodo conseguimos tornar uma pequena voltagem (ou uma pequena corrente) muitas vezes maior.

Na fig. 21-22-b apresentamos a válvula que é encontrada nos aparelhos de TV, usada para produzir as imagens sobre a tela. Esta válvula, denominada *tubo de TV* ou *canhão eletrônico*, é constituída essencialmente das seguintes partes: um filamento aquecido (catodo), uma grade, um ânodo cilíndrico, dois pares de placas, P_1 e P_2 (dispostas como mostra a figura), e uma tela fluorescente. Os elétrons emitidos pelo filamento aquecido são acelerados em direção ao ânodo por uma diferença de potencial de vários milhares de volts (cerca de 15 000 V). Após atravessar o ânodo, o feixe de elétrons passa entre as placas P_1 e P_2 e atinge a tela, provocando uma pequena luminosidade (fluorescência) no ponto de impacto. Entre o par de placas P_1 existe um campo elétrico que desvia o feixe de elétrons para cima e para baixo, enquanto o campo elétrico entre o par P_2 desvia o feixe para a direita e para a esquerda. Assim, o feixe de elétrons varre a tela totalmente com grande velocidade, fazendo com que ela se apresente uniformemente iluminada. Obedecendo aos sinais que chegam da antena à grade, o feixe de elétrons

adquire maior ou menor intensidade, fazendo com que certas regiões da tela fiquem mais (ou menos) iluminadas durante a varredura. Este fato dá origem à formação das imagens em preto-e-branco que são vistas na tela.

SEMICONDUCTORES TIPOS n E p

É possível que você já tenha ouvido falar que as válvulas eletrônicas estão sendo substituídas por dispositivos muito menores, mais econômicos e mais duráveis, construídos com o auxílio de materiais semicondutores.

Vimos, no Tópico Especial do capítulo anterior, que um semicondutor é uma substância cuja resistência diminui rapidamente à medida que aumentamos sua temperatura. O silício, como dissemos, é um exemplo típico de material semicondutor.

Os cientistas verificaram que, adicionando a um semicondutor quantidades muito pequenas de certas substâncias (chamadas impurezas), as propriedades elétricas do semicondutor sofrem consideráveis modificações. Assim, adicionando-se uma pequena quantidade de arsênio a uma amostra de silício, obtém-se um condutor elétrico semelhante a um metal, isto é, a condução elétrica nesta substância é feita por meio de elétrons livres. Dizemos que um semicondutor como este é do tipo n (condução feita por cargas negativas). Por outro lado, se uma pequena quantidade de boro é adicionada ao silício puro, verifica-se que ele também conduz eletricidade, mas tudo se passa como se a corrente elétrica fosse constituída pelo movimento de cargas positivas. Por este motivo, dizemos que o silício *dopado* com boro é um semicondutor do tipo p (condução por cargas positivas).

JUNÇÕES $n-p$ E $p-n$ USADAS COMO RETIFICADORES

Suponha que um cristal fosse obtido fazendo-se a junção de um semicondutor do tipo n com outro do tipo p , como mostra a fig. 21-23. É possível mostrar que haverá uma troca de cargas elétricas entre eles, fazendo com que, de um lado e de outro da superfície de contato, apareçam cargas positivas e negativas, distribuídas da maneira apresentada na fig. 21-23.

Ligando-se uma bateria a um cristal $n-p$, de modo que o contato do pólo positivo desta bateria seja feito com o lado n e o do pólo negativo com o lado p , obtemos o circuito mostrado na fig. 21-24-a. Ao ser estabelecida esta ligação, observa-se um grande aumento das cargas positivas e negativas da junção. Este fato impede que a corrente passe através do cristal $n-p$ (ele se comporta como se fosse um material de resistência muito elevada) e, conseqüentemente, não há corrente no circuito. Entretanto, invertendo-se a polaridade da bateria (o pólo positivo ligado ao lado p e o negativo, ao lado n) haverá uma diminuição considerável das cargas elétricas na junção (fig. 21-24-b). Nestas condições, a corrente elétrica

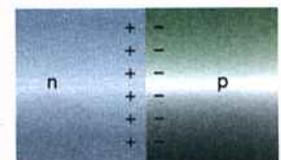


Fig. 21-23: Esquema da junção de um semicondutor de tipo n com um de tipo p .

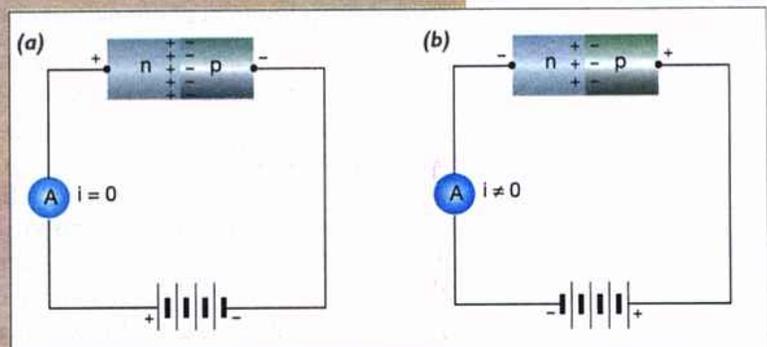


Fig. 21-24: No circuito da figura (a) a corrente é nula e, em (b), há passagem de corrente.

pode passar facilmente pelo cristal $n-p$ e o amperímetro acusará a existência de uma corrente no circuito.

Esta análise que acabamos de fazer nos mostra que um cristal de junção $n-p$ se comporta como uma válvula diodo: deixa a corrente elétrica fluir através dele em um sentido (de p para n), mas impede a passagem no sentido contrário (de n para p). É claro, então, que um cristal $n-p$, do mesmo modo que uma válvula diodo, poderá ser usado como retificador de corrente, isto é, ele é um diodo semiconductor. Em virtude de não necessitarem de aquecimento, os diodos semicondutores são bem mais econômicos do que as válvulas comuns, não provocam aquecimentos inconvenientes dos aparelhos e começam a funcionar prontamente quando são ligados (observe que os aparelhos a válvula, ao serem ligados, somente começam a funcionar depois de um certo tempo, necessário para os filamentos se aquecerem). Além disso, eles apresentam uma série de outras vantagens (custo, tamanho, durabilidade etc.) que os torna muito mais convenientes do que a válvula de filamento.

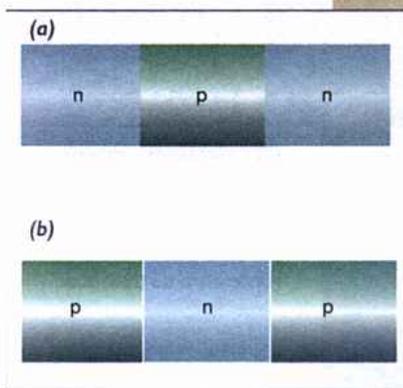


Fig. 21-25: Um transistor pode ser obtido por uma junção $n-p-n$ como em (a), ou $p-n-p$ como em (b).

O QUE É UM TRANSISTOR

Não são apenas as válvulas diodo que estão sendo substituídas, com grandes vantagens, por dispositivos construídos à base de semicondutores. Também a válvula triodo, que, como dissemos, é usada com o objetivo de amplificar sinais elétricos, está sendo substituída por um cristal constituído por junções de semicondutores. Em 1948, três cientistas americanos descobriram que um cristal de semicondutores, apresentando duas junções (como mostra a fig. 21-25), é capaz de produzir ampliações semelhantes àquelas obtidas com uma válvula triodo. Estas junções podem ser do tipo $n-p-n$ (fig. 21-25-a) ou $p-n-p$ (fig. 21-25-b). Em qualquer um desses casos, o cristal assim obtido é denominado *transistor*, constituindo-se, como você já deve ter ouvido falar, em um dos dispositivos mais empregados nos modernos circuitos eletrônicos. Graças ao grande avanço tecnológico possibilitado pelo transistor, seus inventores receberam o Prêmio Nobel de Física em 1956.



Fig. 21-26: os rádios transistorizados são muito menores do que os antigos rádios a válvula.

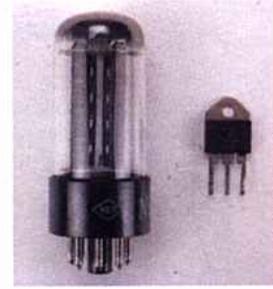
O uso de cristais retificadores (junção $n-p$) e de transistores nos circuitos de rádios, televisores, gravadores, computadores etc. permitiu uma redução considerável no tamanho e no peso destes aparelhos. Os antigos rádios a válvula, por exemplo, eram muito maiores do que os modernos rádios transistorizados (fig. 21-26). Mesmo com válvulas em miniatura, o maior número de dispositivos que se conseguia ligar em circuitos eletrônicos correspondia a uma densidade média de 1 elemento por cm^3 . Com o

uso dos cristais semicondutores, ligados em um circuito impresso, conseguiu-se colocar uma média de até 3 elementos por cm^3 (nos circuitos impressos, os fios de ligação são substituídos por conexões metálicas impressas em uma chapa isolante, na qual os elementos são soldados).

O avanço da eletrônica fez com que a densidade de elementos ligados em um circuito se tornasse cada vez maior. Atualmente, com o uso dos modernos

circuitos integrados (vários elementos, como resistências, transistores etc., agrupados em uma única peça muito pequena), foi possível atingir a fantástica cifra de 30 000 elementos por cm^3 . Sem este desenvolvimento tecnológico, que permitiu tal miniaturização dos circuitos eletrônicos, um moderno computador teria dimensões tão exageradas que sua construção seria inviável.

O circuito integrado costuma ser designado, na linguagem dos técnicos em eletrônica, pelo termo *chip*, palavra de origem inglesa que significa “pequena lasca”. Esta denominação tem sua origem na maneira pela qual se obtém um *chip*: uma pequena placa (lasca) é cortada de um cristal de silício e mínimas quantidades de impurezas são colocadas em determinadas posições desta placa. Estas impurezas são dispostas de maneira a dar origem a diodos, transistores, resistores, e, até mesmo, a capacitores e indutores (componentes do circuito que serão analisados posteriormente). Observe, então, que os componentes tradicionais dos circuitos são substituídos por seus equivalentes criados na própria placa do *chip*, tornando possível a miniaturização. Um *chip* de apenas 1 cm de lado pode conter centenas de milhares de transistores e seu custo é praticamente igual ao de um único transistor isolado.



Sérgio/Quim/SCI Studios

A fotografia apresenta uma válvula triodo e um transistor que desempenha o mesmo papel que esta válvula.



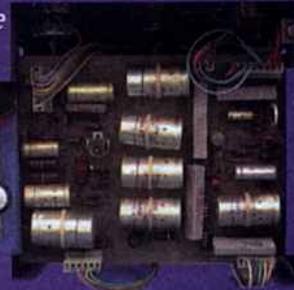
ADS

Os cientistas americanos W. Shockley, W. Brattain e J. Bardeen receberam o Prêmio Nobel de Física, em 1956, por seus trabalhos no desenvolvimento do transistor.

ADS



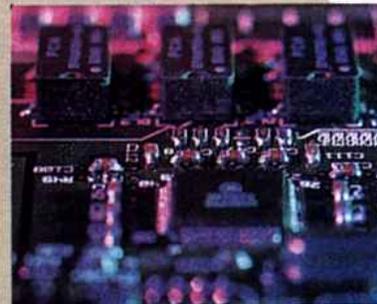
Placa equivalente década de 90



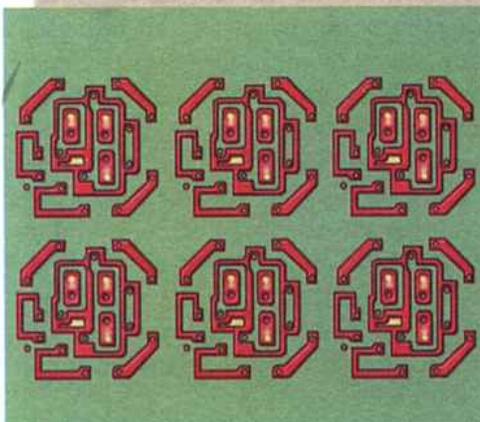
placa de uma fonte de tensão estabilizada da década de 70

Modelo mais antigo de um circuito eletrônico (à direita) e sua versão equivalente, mais moderna, miniaturizada (à esquerda).

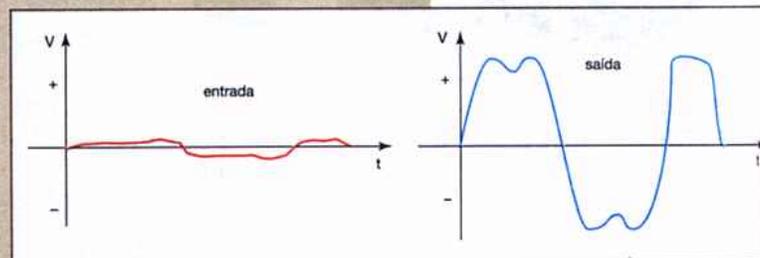
PhotoDisc



Pequenos chips, ou microchips (em cor negra), ligados ao circuito eletrônico de um computador.



Ampliação de uma placa de silício, mostrando seis circuitos integrados (chips).



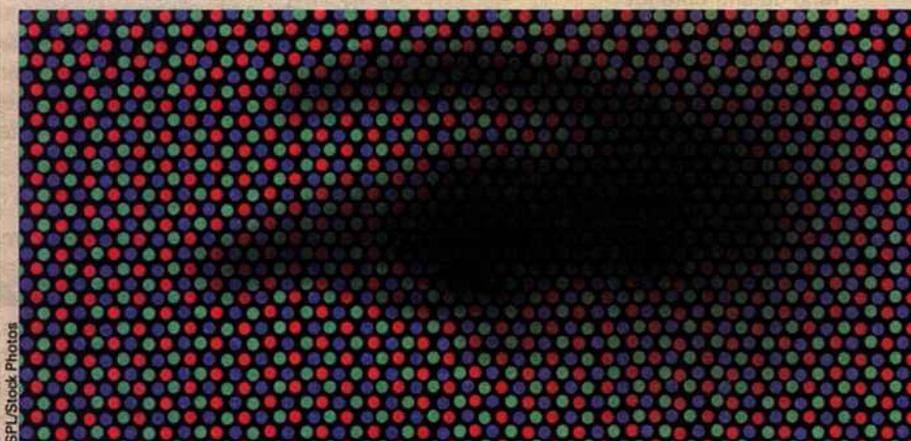
Diagramas que mostram as voltagens de entrada e de saída do chip (amplificada).

TV em cores

Vimos, nesta secção, como um feixe de elétrons, proveniente de um canhão eletrônico, varre a tela de um tubo de TV para formar uma imagem em preto e branco.

Nos aparelhos de TV em cores, o processo de formação da imagem é muito semelhante ao que descrevemos. Entretanto, neste caso são necessários três canhões eletrônicos diferentes, cada um emitindo um feixe de elétrons, os quais atingem simultaneamente uma pequena região da tela.

Cada feixe atinge um ponto desta pequena região, fazendo com que um deles emita luz vermelha, outro emita luz verde e o terceiro emita luz azul. São usadas essas cores porque, a partir de sua superposição, é possível obter um número muito grande de cores com diversas tonalidades. Se você observar a tela bem de perto (ou usando uma lupa), você perceberá que toda ela é coberta por pontos com essas três cores, como mostra a fig. I (em alguns aparelhos, em lugar dos pontos coloridos, a tela apresenta listas verticais, muito próximas, com aquelas cores). A intensidade da cor emitida por cada ponto irá depender da intensidade do feixe de elétrons que o atinge. Cada conjunto de três pontos emitirá as três cores básicas, em intensidades dosadas convenientemente. Observando a tela de uma certa distância, nossos olhos não distinguem os três pontos separadamente e perceberemos a cor correspondente à superposição das cores que emitem. Desta maneira, é possível reproduzir aquele enorme conjunto de colorações que você vê na tela de uma TV em cores (veja a fig. II).



SPUS/Stock Photos

Fig. I: A tela de uma TV em cores é coberta com um número muito grande de pontos que emitem as cores vermelho, verde e azul.

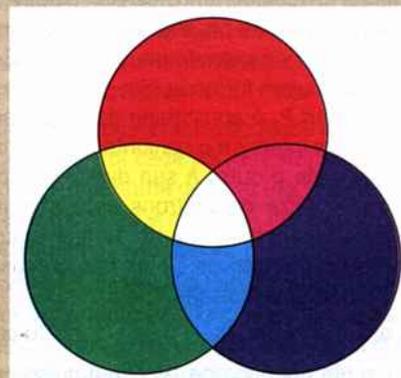


Fig. II: Superpondo convenientemente as cores básicas (vermelho, verde e azul), é possível reproduzir um enorme conjunto de cores diferentes.

revisão revisão revisão revisão revisão revisão reV

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

1. a) O que você entende por um gerador de f.e.m.? Cite alguns exemplos de tais geradores.
b) Escreva a equação que define a f.e.m. de um gerador. Explique o significado de cada termo que aparece nesta equação.
c) Qual é, no S.I., a unidade de medida de f.e.m.?
2. a) O que você entende por um gerador de f.c.e.m.? Cite alguns exemplos de tais dispositivos.
b) Escreva a equação que define a f.c.e.m. de um receptor. Explique o significado de cada termo que aparece nesta equação.
3. Descreva como devemos proceder para dar carga a uma bateria.
4. a) Procure reproduzir o raciocínio feito para se chegar à expressão da potência que um gerador de f.e.m. transfere às cargas que passam através dele.
b) A expressão que você obteve em (a) pode ser usada para calcular a potência transferida a um receptor pelas cargas que passam através dele? Explique.
5. a) O que é resistência interna de um gerador ou receptor?
b) Analise a fig. 21-7 e diga em quais elementos do circuito as cargas ganham energia. E em quais elementos elas perdem energia?
6. a) Escreva as expressões matemáticas das quantidades de energia recebidas ou perdidas pelas cargas ao passarem pelos diversos elementos do circuito da fig. 21-7.
b) Lembrando-se do Princípio de Conservação da Energia, obtenha a expressão da equação do circuito (para o circuito da fig. 21-7).
c) Escreva a expressão generalizada da equação do circuito e explique o significado dos termos que aparecem nesta equação.
7. a) Procure reproduzir o raciocínio feito na seção 21.3 para se obter a relação $V_{AB} = \varepsilon - ri$ (explique claramente o significado de cada termo desta expressão).
b) Você acha que a voltagem entre os pólos de um gerador é sempre igual à sua f.e.m.? Explique.
c) Cite duas situações nas quais a voltagem entre os pólos de um gerador é igual ao valor de sua f.e.m.

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

O primeiro dispositivo com o qual se conseguiu obter uma corrente elétrica de duração apreciável foi a pilha de Volta, inventada, em 1.800, pelo cientista italiano Alessandro Volta. Esta pilha era constituída por duas placas, uma de zinco e outra de cobre, mergulhadas em uma solução de ácido sulfúrico.

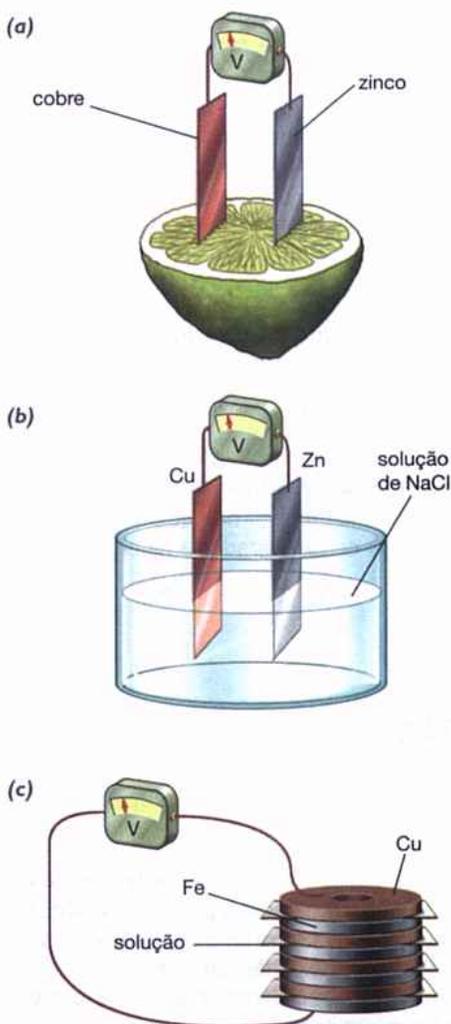
Nesta experiência, vamos construir algumas pilhas semelhantes à pilha de Volta, mas usaremos outras substâncias em lugar do ácido sulfúrico, já que este ácido exige um certo cuidado em seu manuseio.

- 1.º) O ácido sulfúrico pode ser substituído pelo ácido existente, por exemplo, no caldo de um limão. Para verificar isto, introduza uma pequena placa de cobre e outra de zinco em um limão, como mostra a figura (a) desta experiência. Usando um voltímetro, meça e anote a f.e.m. desta pilha.

- 2.º) Para verificar que a f.e.m. da pilha depende da solução na qual as placas estão mergulhadas, introduza as placas de cobre e zinco em uma solução de sal de cozinha (figura (b) desta experiência). Meça, com o voltímetro, a f.e.m. desta pilha e verifique se ela, de fato, é diferente da f.e.m. obtida no item 1.º.
- 3.º) Verifique, agora, que a f.e.m. depende também do material que constitui cada placa. Para isto, substitua a placa de zinco por uma de ferro (na solução de sal de cozinha) e meça a f.e.m. desta nova pilha. Compare com os resultados anteriores.
- 4.º) Você poderá construir uma bateria, semelhante àquela feita por Volta, empilhando pequenos discos de ferro (arruelas, por exemplo) e cobre, separados por um papel poroso embebido em água com sal de cozinha. Este empilhamento deve ser feito na ordem indicada

na figura (c) desta experiência. Usando um voltímetro, meça a f.e.m. de cada elemento (ferro, papel e cobre) e também a f.e.m. do conjunto que constitui a bateria.

Observação: Se não dispuser de um voltímetro para medir a f.e.m. das pilhas construídas, você poderá perceber que realmente existe uma voltagem entre seus pólos colocando os fios que estão ligados a eles em contato com sua língua (fechando o circuito através da saliva). Você sentirá um ligeiro formigamento causado pela passagem da corrente.



Primeira experiência.

Segunda experiência

Corte lateralmente o invólucro de uma pilha seca e, abrindo-a totalmente, observe sua constituição interna. Procure identificar cada uma das seguintes partes que constituem a pilha:

- um invólucro de zinco, que é o pólo negativo, em cuja base se faz o contato para o circuito externo;

- uma camada de substância gelatinosa cobrindo internamente o invólucro de zinco. Esta substância gelatinosa contém cloreto de amônio e constitui o eletrólito da pilha, desempenhando o mesmo papel da solução de ácido sulfúrico na pilha de Volta;
- um bastão central de carvão, que é o pólo positivo, em cuja extremidade superior se faz o contato para o circuito externo;
- uma substância escura envolvendo o bastão de carvão. Esta substância é constituída por uma mistura de carvão em pó e bióxido de manganês. A função do bióxido de manganês é impedir que o hidrogênio se deposite no pólo positivo, o que afeta o funcionamento da pilha.

Observe a fig. 20-8-b, do capítulo anterior, que apresenta um corte da pilha seca, onde estão indicadas estas partes que você observou.

Terceira experiência

- 1º) Como dissemos no texto deste capítulo, a f.e.m. de uma pilha depende apenas das substâncias que a constituem. Assim, uma pilha seca grande e outra pequena, que são fabricadas com as mesmas substâncias, devem apresentar a mesma f.e.m. Verifique este fato, medindo com um voltímetro (de grande resistência interna) a f.e.m. de pilhas secas de diversos tamanhos. As medidas que você obtiver estão de acordo com a afirmação feita?
- 2º) Usando o mesmo voltímetro, meça a f.e.m. de cada elemento (cada caixinho) de uma bateria de automóvel e anote estes valores.
- 3º) Baseando-se nas medidas feitas na 2ª parte desta experiência, calcule qual deve ser a f.e.m. da bateria. Medindo diretamente com o voltímetro esta f.e.m., verifique se o resultado está de acordo com o cálculo feito por você.

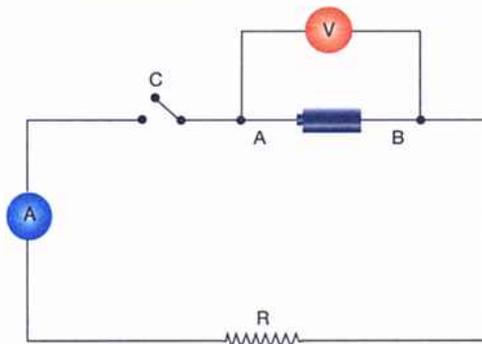
Quarta experiência

Podemos medir a resistência interna de uma pilha seca montando o circuito apresentado na figura desta experiência. Observe que ele é constituído pela pilha cuja resistência interna desejamos determinar, por um voltímetro ligado aos pólos desta pilha, por uma resistência R (que poderá ser o fio de níquel-cromo ou aço usado em experiências anteriores) e por um amperímetro que permite a leitura da corrente fornecida pela pilha.

- 1º) Com a chave C desligada, anote a indicação do voltímetro. Como sua resistência é muito grande, essa indicação representa a f.e.m. \mathcal{E} da pilha.
- 2º) Feche o circuito, anote a nova indicação V_{AB} do voltímetro e a corrente i indicada pelo amperímetro (como sabemos, V_{AB} deve ser um pouco inferior a \mathcal{E}).
- 3º) Você aprendeu na secção 21.3 que a indicação do voltímetro ligado aos pólos da pilha é dada por

$$V_{AB} = \mathcal{E} - ri$$

onde r é a resistência interna da pilha. Usando os valores de V_{AB} , ϵ e i que você mediu, calcule a resistência interna desta pilha.



Quarta experiência.

Quinta experiência

Como você deve saber de seu curso de Química, quando um sal é dissolvido na água ele se separa em íons positivos e negativos, fazendo com que a solução se torne condutora de eletricidade. Então, se introduzirmos nesta solução duas placas metálicas e aplicarmos a elas uma diferença de potencial, os íons se deslocarão para estas placas. Se um destes íons for metálico (íon positivo), ele se depositará sobre a placa negativa (menor potencial). Este fato é utilizado na indústria para recobrir peças com finas camadas metálicas obtendo-se, assim, peças niqueladas, prateadas, douradas, cobreadas etc.

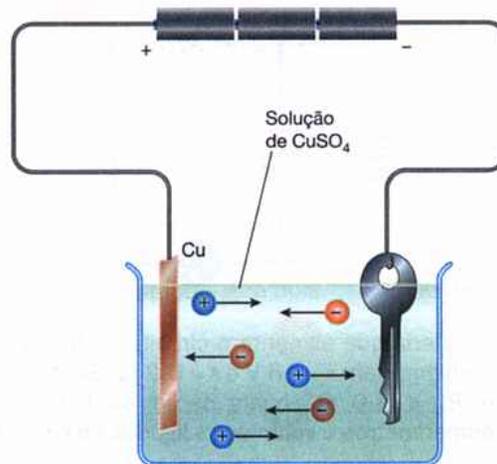
Nesta experiência, você vai cobrir uma peça metálica qualquer como, por exemplo, uma chave, com uma camada de cobre (cobrear a chave).

Faça uma solução aquosa de sulfato de cobre (CuSO_4 , que você pode conseguir no laboratório de Química ou adquirir a baixo custo em casas comerciais especializadas).

Introduza, no recipiente que contém a solução, uma placa de cobre e o objeto a ser recoberto (veja a figura desta experiência). Este objeto deve estar desengordurado (use álcool) e bem limpo. Associe duas ou três pilhas secas e ligue o pólo positivo desta associação à placa de cobre e o pólo negativo ao objeto.

Como o sulfato de cobre, na solução, encontrava-se dissociado em íons Cu^{++} e SO_4^{--} , estes íons se movimentam nos sentidos indicados na figura: os íons Cu^{++} dirigem-se para o objeto (a chave) e depositam-se sobre ele, enquanto os íons SO_4^{--} deslocam-se para a placa de Cu e, reagindo com ela, regeneram o CuSO_4 . Assim, o cobre da placa passa para a solução e, portanto, através deste processo, ele vai sendo transferido para o objeto.

Mantenha ligado durante alguns minutos o circuito que você montou. Depois deste tempo, observe o objeto e verifique que realmente uma camada de cobre se depositou sobre ele.

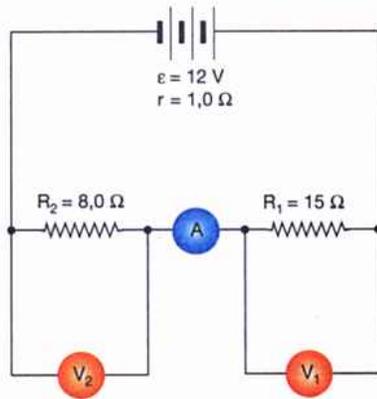


Quinta experiência.

problemas e testes problemas e testes problemas e tes

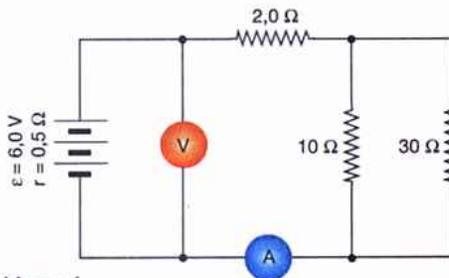
1. Em uma pequena lanterna é usada uma pilha, cuja f.e.m. é 1,5 V, que fornece à lâmpada uma corrente constante de 200 mA. Supondo que a lâmpada permaneça acesa durante 5,0 horas, determine:
 - a) A potência que a pilha transfere às cargas que passam em seu interior.
 - b) A energia química da pilha que se transforma em energia elétrica durante este tempo.
2. Uma pessoa possui duas pilhas secas comuns, sendo uma pequena e a outra grande. Os elementos empregados na construção destas pilhas, como você sabe, são os mesmos.
 - a) A f.e.m. da pilha grande é maior, menor ou igual à

- a) da pilha pequena?
 - b) Ligando-se uma lâmpada à pilha grande, o brilho que ela apresentará será maior, menor ou igual ao que ela apresenta quando é ligada à pilha pequena (considere desprezíveis as resistências internas das pilhas)?
 - c) Qual das duas pilhas será capaz de manter a lâmpada brilhando durante mais tempo?
3. Analisando o circuito mostrado na figura deste problema, determine:
 - a) A leitura do amperímetro.
 - b) As leituras dos voltmímetro.



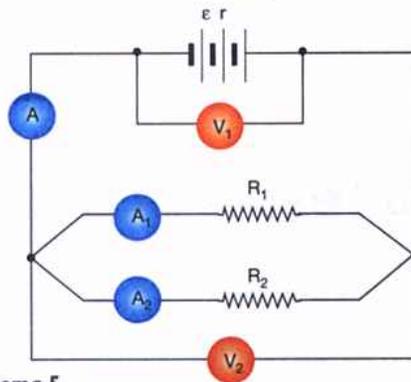
Problema 3.

4. Considerando os dados apresentados na figura deste problema, determine as leituras do amperímetro e do voltímetro mostrados.



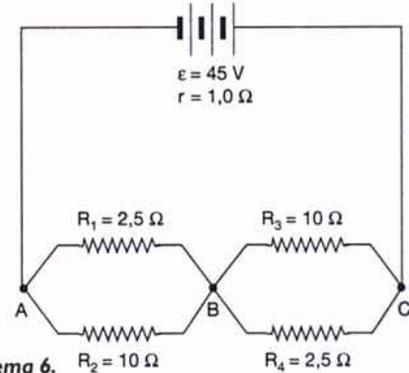
Problema 4.

5. A bateria que alimenta o circuito da figura deste problema tem $\varepsilon = 18 \text{ V}$ e $r = 0,2 \Omega$. Se $R_1 = 1,5 \Omega$ e $R_2 = 3,0 \Omega$, quais serão as leituras dos amperímetros e voltímetros ligados no circuito?



Problema 5.

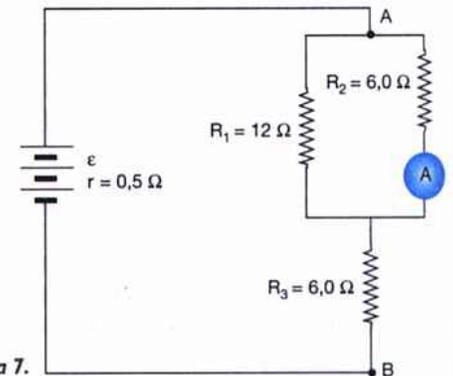
6. As afirmativas seguintes estão relacionadas com o circuito apresentado na figura deste problema. Assinale aquelas que estão corretas:
- A resistência equivalente do circuito externo é igual a $4,0 \Omega$.
 - A corrente que passa pela bateria vale $9,0 \text{ A}$.
 - A voltagem V_{AB} é igual à voltagem V_{BC} .
 - A corrente em R_1 é igual à corrente em R_4 .
 - A corrente em R_1 é quatro vezes maior do que a corrente em R_3 .



Problema 6.

7. A leitura do amperímetro mostrado no circuito da figura deste problema é $0,80 \text{ A}$. Analise as afirmativas seguintes, relativas a este circuito, e assinale aquelas que estão corretas:

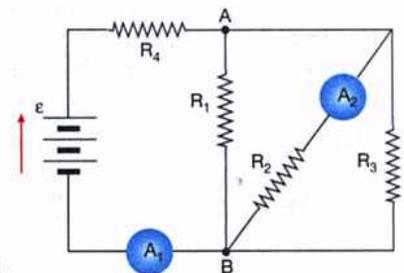
- A corrente em R_1 vale $1,6 \text{ A}$.
- A corrente em R_3 vale $1,2 \text{ A}$.
- A potência gerada, por efeito Joule, no circuito externo, é 12 W .
- A voltagem V_{AB} vale 12 V .
- A f.e.m. da bateria vale 12 V .



Problema 7.

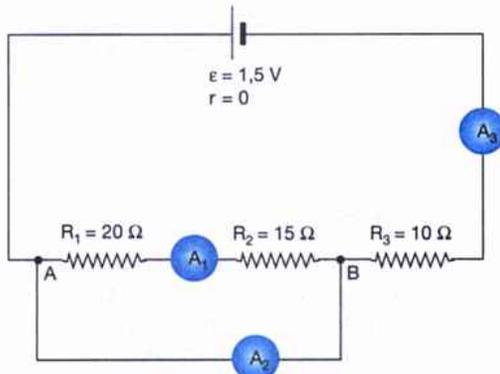
8. No circuito mostrado na figura deste problema temos: $\varepsilon = 36 \text{ V}$; $R_1 = R_2 = R_3 = 60 \Omega$ e $R_4 = 100 \Omega$. Considere desprezível a resistência interna da bateria. Entre as afirmativas seguintes, assinale aquelas que estão corretas:

- R_1 , R_2 e R_3 estão ligadas em paralelo.
- A resistência total do circuito vale 120Ω .
- A leitura do amperímetro A_1 é $0,30 \text{ A}$.
- A voltagem entre A e B vale $6,0 \text{ V}$.
- A leitura do amperímetro A_2 é $0,10 \text{ A}$.



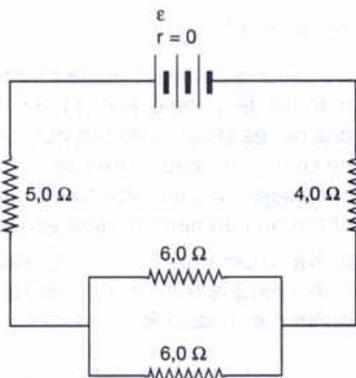
Problema 8.

9. Três resistências, R_1 , R_2 e R_3 , estavam inicialmente ligadas em série a uma pilha de f.e.m. $\epsilon = 1,5 \text{ V}$ (veja a figura deste problema). Os pontos A e B mostrados na figura foram, então, ligados por um fio de resistência desprezível (como é costume dizer, estabeleceu-se um curto-circuito entre A e B). Nestas condições, determine:
- A leitura do amperímetro A_1 .
 - A leitura do amperímetro A_2 .
 - A leitura do amperímetro A_3 .



Problema 9.

10. No circuito mostrado na figura deste problema, a f.e.m. da bateria é desconhecida e sua resistência interna é nula. Observando o circuito, responda:
- Em qual das resistências há maior dissipação de potência por efeito Joule?
 - Supondo que em nenhuma das resistências a potência dissipada possa ser superior a 20 W, qual o valor máximo que poderia ter a f.e.m. da bateria?



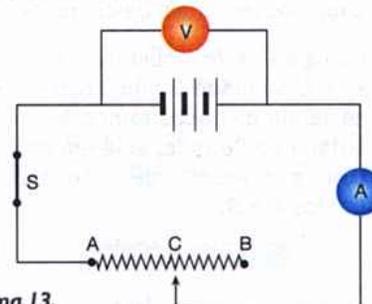
Problema 10.

11. Uma bateria, de f.e.m. $\epsilon = 12 \text{ V}$ e resistência interna $r = 0,5 \Omega$, é ligada em série com uma resistência $R = 4,0 \Omega$ e com um motor elétrico de f.c.e.m. $\epsilon' = 6,0 \text{ V}$, cuja resistência interna é $r' = 1,5 \Omega$.
- Faça um esquema deste circuito.
 - Qual o valor da corrente que passa no motor?
 - Qual a potência dissipada, por efeito Joule, no motor?

12. Suponha que, em virtude de um defeito mecânico, o motor mencionado no problema anterior parasse de girar (no entanto, a corrente elétrica continua passando no motor).
- Qual seria, nestas condições, o valor da corrente que iria passar no motor?
 - Qual seria, então, a potência dissipada por efeito Joule neste motor?
 - Comparando as respostas deste problema com as do problema anterior, explique por que um motor elétrico pode se queimar quando ele é impedido de girar (sem que a corrente seja desligada).

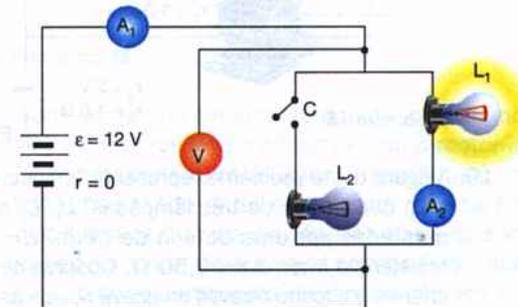
13. A bateria mostrada na figura deste problema tem f.e.m. ϵ e resistência interna r . Ela está ligada a um reostato e a uma chave S que pode abrir ou fechar o circuito. Entre as afirmativas seguintes, assinale aquela que está errada:

- Se a chave S estiver aberta, a leitura do voltímetro será igual a ϵ .
- Se S estiver fechada e o cursor em C, a leitura do voltímetro será maior do que ϵ .
- Com S fechada e o cursor em B, a leitura do voltímetro será menor do que ϵ .
- Estando S fechada e o cursor em A, a leitura do amperímetro será máxima.
- Estando S fechada e o cursor em A, a leitura do voltímetro será nula.



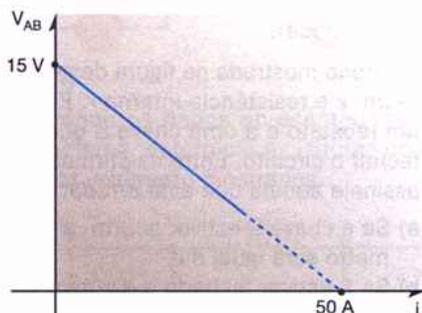
Problema 13.

14. Observe com atenção o circuito apresentado na figura deste problema. Ligando-se a chave C para acender a lâmpada L_2 , responda:
- A leitura de V aumenta, diminui ou não se altera?
 - A leitura de A_2 aumenta, diminui ou não se altera?
 - A leitura de A_1 aumenta, diminui ou não se altera?



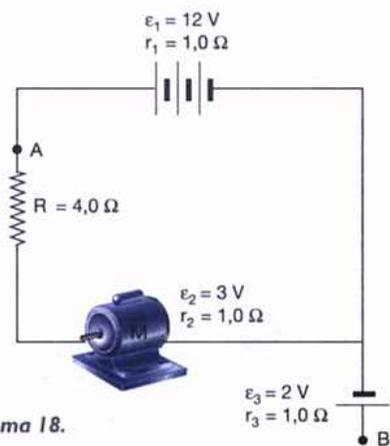
Problema 14.

15. Responda às questões do problema anterior supondo que a resistência interna da bateria não seja desprezível.
16. O gráfico deste problema representa a voltagem entre os pólos de uma bateria em função da corrente que ela fornece quando é ligada a diferentes resistências externas. A partir destas informações, determine:
- A f.e.m. da bateria.
 - A resistência interna da bateria.



Problema 16.

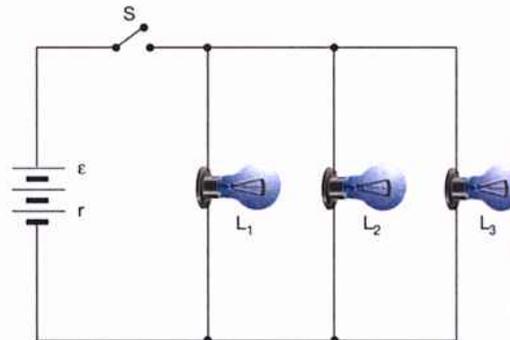
17. Um motor elétrico, cuja f.c.e.m. é $\varepsilon = 12$ V, possui uma resistência interna $r = 0,50 \Omega$. Sabendo-se que ele é percorrido por uma corrente $i = 4,0$ A, qual é a diferença de potencial V_{AB} que está aplicada nos terminais deste motor?
18. Na figura deste problema, o motor M , de f.c.e.m. ε_2 , é alimentado por uma bateria de f.e.m. ε_1 . Observando os dados fornecidos na figura e que a bateria de f.e.m. ε_3 está em circuito aberto, calcule a diferença de potencial, V_{AB} , entre os pontos A e B.



Problema 18.

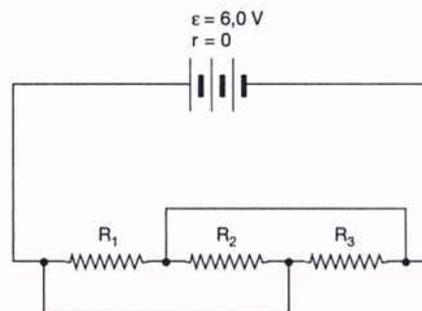
19. A figura deste problema representa um circuito elétrico constituído de três lâmpadas, L_1 , L_2 e L_3 , alimentadas por uma bateria de f.e.m. $\varepsilon = 32$ V e resistência interna $r = 0,50 \Omega$. Observa-se, ao fechar-se o circuito através da chave S, que as lâmpadas dissipam as seguintes potências: $P_1 = 30$ W,

$P_2 = 45$ W e $P_3 = 45$ W. Sabendo-se que, em cada 10 s, a bateria transforma 1 280 J de sua energia interna em energia elétrica das cargas, calcule a corrente i_3 que passa na lâmpada L_3 e o valor da resistência, R_3 , desta lâmpada.



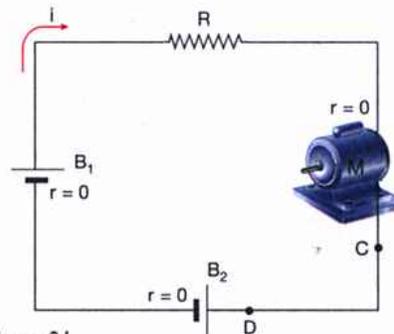
Problema 19.

20. As resistências mostradas na figura deste problema valem $R_1 = 6,0 \Omega$, $R_2 = 6,0 \Omega$ e $R_3 = 3,0 \Omega$. Determine a corrente que passa em cada uma destas resistências.



Problema 20.

21. No circuito da figura deste problema, B_1 e B_2 são baterias de automóvel e M é um motor elétrico, todos de resistência interna nula. A corrente circula no sentido indicado. Dizer se, em cada um dos trechos seguintes do circuito, as cargas perdem, ganham ou não perdem nem ganham energia:
- Na bateria B_1 .
 - Na bateria B_2 .
 - Na resistência R .
 - No motor M .
 - No fio entre C e D.

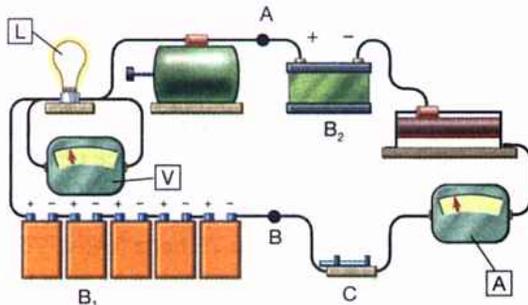


Problema 21.

22. No problema anterior, indicar qual a transformação de energia que ocorre em cada um dos trechos mencionados.
23. Considere, para o circuito mostrado na figura deste problema, os seguintes valores:
- Bateria B_1 (conjunto) $\rightarrow \epsilon_1 = 10 \text{ V}, r_1 = 0,5 \Omega$
 Bateria B_2 $\rightarrow \epsilon_2 = 2 \text{ V}, r_2 = 1 \Omega$
 Motor $\rightarrow \epsilon_3 = 4 \text{ V}, r_3 = 0,5 \Omega$
 Lâmpada L $\rightarrow R_L = 5 \Omega$
 Reostato $\rightarrow R_2 = 3 \Omega$

O amperímetro e o voltímetro são ideais. Calcule:

- a) As leituras do amperímetro e do voltímetro.
 b) A diferença de potencial V_{AB} , percorrendo o circuito no sentido da corrente.
 c) Repita o cálculo de V_{AB} , percorrendo o circuito no sentido contrário ao da corrente. Verifique se o resultado é o mesmo obtido em (b).

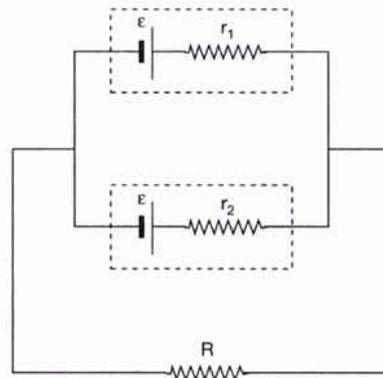


Problema 23.

24. Uma bateria, de f.e.m. $\epsilon_1 = 220 \text{ V}$ e resistência interna $r_1 = 10 \Omega$, está colocada em um circuito, ligada em série com um motor de f.c.e.m. $\epsilon_2 = 180 \text{ V}$ e resistência interna $r_2 = 10 \Omega$.
- a) Determine a potência útil do motor, isto é, a potência elétrica que ele converte em trabalho mecânico.
 b) Qual é a potência total que é fornecida ao motor pela bateria?
 c) Chama-se rendimento de um motor o quociente entre a sua potência útil e a potência total fornecida a ele. Determine o rendimento deste motor, expressando-o sob forma percentual.
 d) Chama-se rendimento de um gerador de f.e.m. a relação entre sua potência útil (potência que ele entrega ao circuito) e sua potência total (potência que ele transfere às cargas). Calcule o rendimento da bateria que está alimentando o circuito, expressando-o sob forma percentual.
25. Na figura deste problema temos duas baterias, de mesma f.e.m. igual a ϵ e resistências internas r_1 e r_2 , associadas em paralelo. A f.e.m. da associação é igual à f.e.m. de uma das baterias, isto é, seu va-

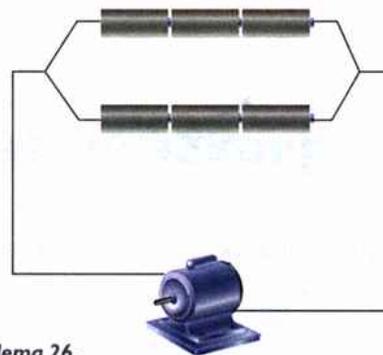
lor é igual a ϵ . Portanto, esta associação não é feita com o objetivo de obter uma f.e.m. maior (como é o caso da ligação em série).

- a) Você consegue, então, perceber alguma vantagem na associação de baterias, de mesma f.e.m., em paralelo?
 b) Na figura, considere $\epsilon = 12 \text{ V}, r_1 = 4 \Omega, r_2 = 6 \Omega$ e $R = 7,6 \Omega$. Determine o valor da corrente na resistência R .



Problema 25.

26. Seis pilhas secas idênticas, cada uma de f.e.m. igual a $1,5 \text{ V}$ e resistência interna $0,4 \Omega$, são associadas da maneira mostrada na figura deste problema. Esta associação é usada para fazer funcionar um pequeno motor de f.c.e.m. igual a $1,5 \text{ V}$ e resistência interna $1,4 \Omega$ (você já deve ter tido oportunidade de ver uma associação como esta em brinquedos, gravadores etc.). Tendo em vista o que você aprendeu no problema 25, determine a intensidade da corrente que passa no motor.

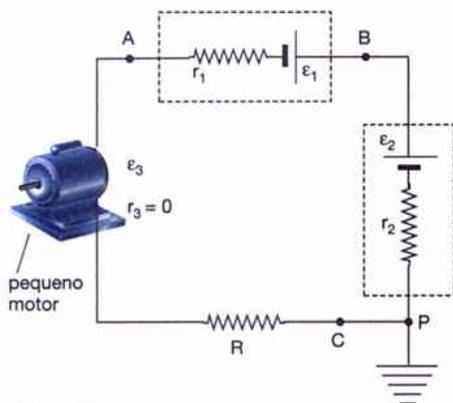


Problema 26.

27. Sabe-se que no circuito elétrico de um automóvel, o cabo que leva a corrente para o motor de arranque (partida) está ligado diretamente à bateria, não tendo parte em comum com os fios que ligam os faróis a ela. Apesar disso, quando ligamos o motor de arranque com os faróis acesos, notamos uma sensível diminuição em sua intensidade luminosa. Por que isto ocorre?

28. No circuito mostrado na figura deste problema, tem-se: $\epsilon_1 = 12 \text{ V}$, $r_1 = 1 \Omega$, $\epsilon_2 = 6 \text{ V}$, $r_2 = 1 \Omega$, $\epsilon_3 = 2 \text{ V}$, $r_3 = 0$ e $R = 2 \Omega$. O circuito foi aterrado no ponto P , o qual será considerado como nível de potencial (este procedimento é usual na análise dos circuitos elétricos). Qual será então:

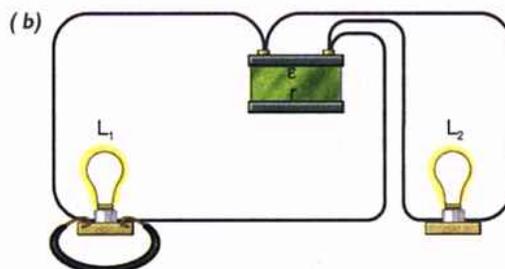
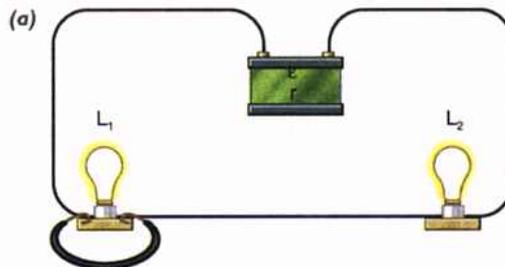
- O potencial do ponto A ?
- O potencial do ponto B ?
- O potencial do ponto C ?



Problema 28.

29. Duas lâmpadas, L_1 e L_2 , são ligadas a uma bateria de f.e.m. $\epsilon = 12 \text{ V}$ e resistência interna $r = 1 \Omega$, de duas maneiras diferentes, como mostram as figuras (a) e (b) deste problema. Em ambos os casos, os bornes da lâmpada L_1 estão ligados por um fio de resistência desprezível (curto-circuito) e a resistência de cada lâmpada é $R = 5 \Omega$.

- Determinar a intensidade da corrente em L_1 e em L_2 para o caso da figura (a).
- Faça o mesmo para o caso da figura (b).
- Qual é o valor da corrente no fio que liga L_1 à bateria, no circuito da figura (b)?



Problema 29.

30. Um certo tipo de "peixe elétrico" é capaz de aplicar um choque com uma voltagem de 60 V e uma corrente de 16 A , durante 5 ms . Em cada célula deste peixe existe uma diferença de potencial de aproximadamente 100 mV . Geralmente, ele aplica uma série de choques sucessivos, com uma frequência média de 75 hertz (isto é, 75 choques por segundo).

- Quantas células do peixe estão ligadas em série para proporcionar a voltagem que ele é capaz de aplicar?
- Qual é a energia que o peixe transfere para a vítima em cada 1 s ?
- Quantas lâmpadas de 60 W , 60 V , poderiam ser mantidas acesas por este peixe?

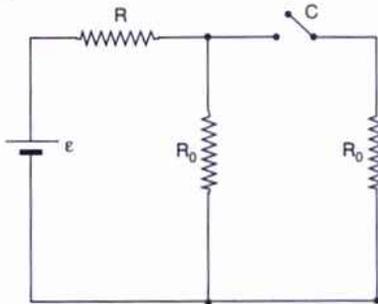
estibular questões de vestibular questões de vesti

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

tares problemas suplementares problemas suplem

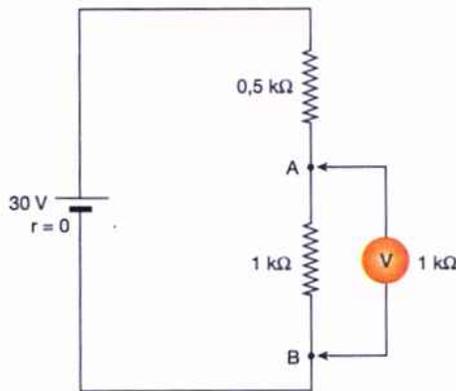
- Uma pilha seca, de f.e.m. $\epsilon = 1,5 \text{ V}$, quando nova tem uma resistência interna de $0,05 \Omega$ e, após um certo tempo de uso, esta resistência aumenta para $0,25 \Omega$. Uma lâmpada, cujo filamento tem resistência igual a $0,25 \Omega$, é ligada à pilha nova e, em seguida, à pilha usada.

- a) Calcule a potência dissipada na lâmpada em cada um dos dois casos mencionados.
 - b) Quantas vezes menor tornou-se a potência desta lâmpada ao ser ligada à pilha usada?
2. Quando a chave C da figura deste problema está aberta, a potência dissipada na resistência R_0 é P . Quando C está fechada, a potência total dissipada nos dois resistores R_0 é ainda P . Calcule o valor de R , em função de R_0 , para o qual esta situação é observada (a resistência interna da bateria é desprezível).



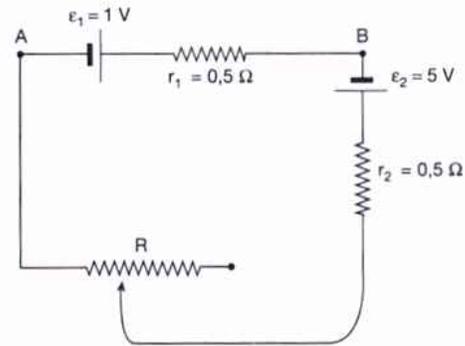
Problema suplementar 2.

3. Um motor elétrico, ligado a uma tomada de 120 V, é percorrido por uma corrente de 2 A. Travando-se o motor, de modo que ele seja impedido de girar, a corrente nele aumenta para 20 A. Calcule, para este motor:
- a) O valor de sua resistência interna.
 - b) O valor de sua f.c.e.m.
4. Um estudante desejava medir a tensão entre os pontos A e B mostrados na figura deste problema. Para isto, ele ligou entre esses pontos um voltímetro de resistência interna igual a $1\text{ k}\Omega$. Considerando os dados constantes na figura, determine o valor do erro cometido nesta medida, expressando-o em forma percentual.



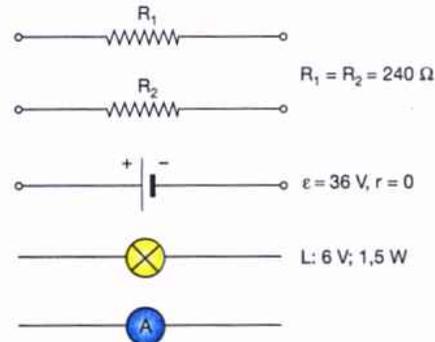
Problema suplementar 4.

5. Dado o circuito apresentado na figura deste problema, determine o valor da resistência R do reostato de tal modo que seja nula a voltagem entre os pontos A e B .



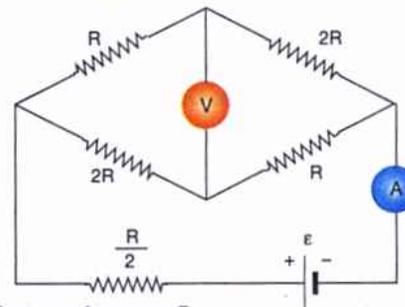
Problema suplementar 5.

6. Uma pessoa tem à sua disposição os elementos mostrados na figura deste problema. Ela deve montar um circuito em que a lâmpada funcione de acordo com suas especificações e o amperímetro indique a corrente que passa por ela.
- a) Qual a corrente que será indicada pelo amperímetro?
 - b) Desenhe o circuito que a pessoa deve montar.



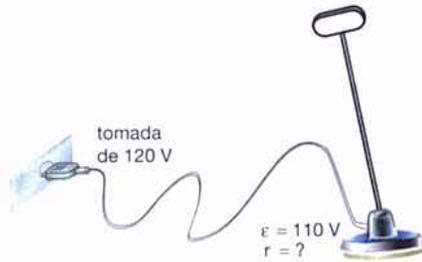
Problema suplementar 6.

7. Considere o circuito mostrado na figura deste problema, onde $\epsilon = 10\text{ V}$ e $R = 10\ \Omega$. Suponha que o voltímetro e o amperímetro são aparelhos ideais. Determine a leitura:
- a) Do amperímetro A .
 - b) Do voltímetro V .



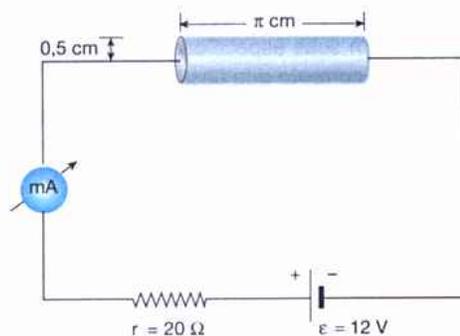
Problema suplementar 7.

8. A figura deste problema representa o circuito elétrico de uma enceradeira em funcionamento. A potência elétrica total dissipada por ela é de 60 W e sua f.c.e.m. é $\epsilon = 110\text{ V}$. Determine a resistência interna da enceradeira.



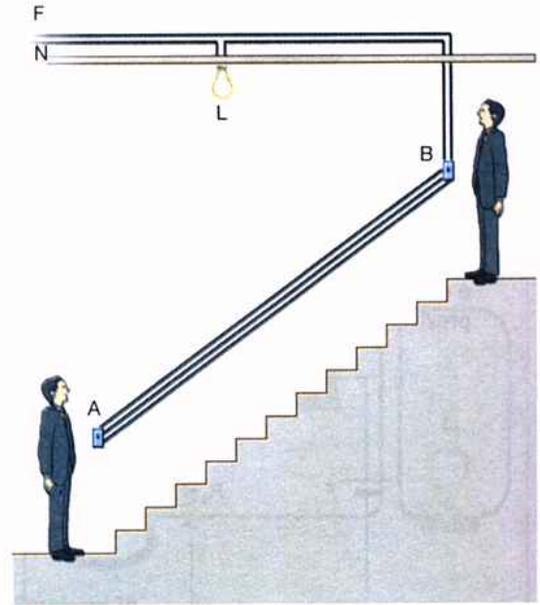
Problema suplementar 8.

9. Uma bateria, de f.e.m. $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$ e resistência interna $r = 20 \Omega$, fornece corrente ao condutor cilíndrico mostrado na figura deste problema. Sabendo que a leitura do miliamperímetro é de 100 mA , determine a resistividade do condutor cilíndrico.

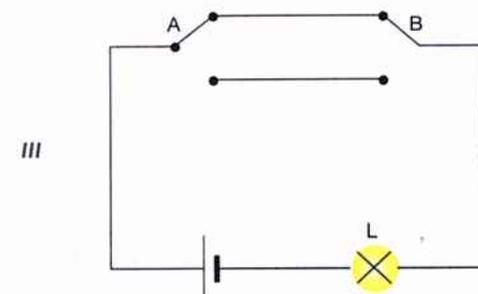
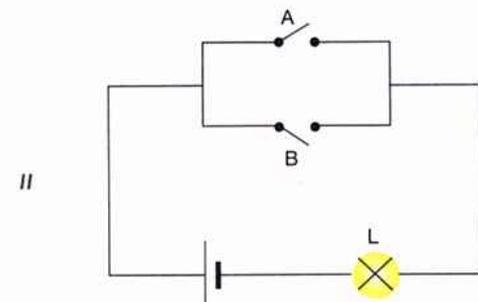
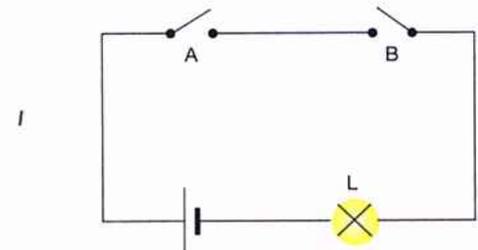


Problema suplementar 9.

10. A carga total que uma bateria nova é capaz de fornecer é dada, pelo fabricante, em $A \cdot h$ (ampère \times hora), como provavelmente você já deve ter observado em uma loja especializada. Suponha uma bateria nova, cuja carga é de $60 \text{ A} \cdot h$ e $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$.
- Qual é, em coulombs, a carga total que esta bateria pode fornecer a um circuito?
 - Durante quantas horas esta bateria seria capaz de manter acesa uma lâmpada de 60 W , 12 V , ligada aos seus terminais (suponha que a corrente na lâmpada permaneça constante)?
11. Um motor, ligado a uma bateria de f.e.m. $\mathcal{E} = 10 \text{ V}$ e resistência interna desprezível, está levantando um peso $P = 4,0 \text{ N}$ com uma velocidade constante $v = 2,0 \text{ m/s}$. A potência dissipada por efeito Joule, no motor, é $2,0 \text{ W}$. Determine, para este motor:
- A corrente que passa por ele.
 - Sua resistência interna.
 - Sua f.c.e.m.
12. Um circuito elétrico muito comum em residências é o circuito de um interruptor, denominado *three-way* ou interruptor paralelo, usado para que seja possível ligar ou desligar uma lâmpada L , tanto utilizando um interruptor A , quanto um interruptor B , situados em posições distanciadas uma da outra. Analise os circuitos apresentados na figura deste problema e indique aquele que corresponde ao *three-way*.



O *three-way* ou interruptor paralelo nos permite apagar e acender a lâmpada, quer estejamos no alto, quer no pé da escada (veja o problema suplementar 12).

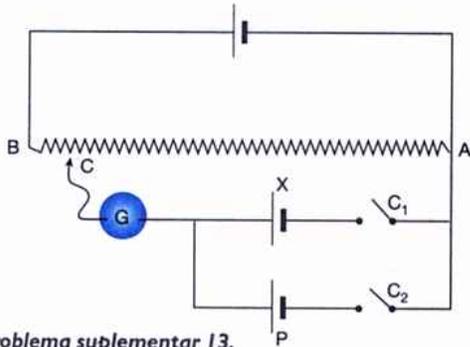


Problema suplementar 12.

13. O circuito mostrado na figura deste problema, denominado circuito do potenciômetro, é um dispositivo que nos permite medir com precisão a f.e.m. ϵ_x , de uma bateria X, comparando-a com a f.e.m. ϵ_p de uma bateria padrão P. Para realizar esta medida, procede-se da seguinte maneira:

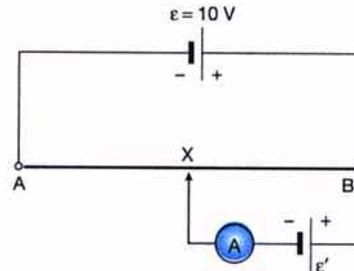
- 1º - Liga-se apenas a chave C_1 e desloca-se o cursor C ao longo do fio uniforme AB (reostato), até que a leitura do galvanômetro G se anule. Seja L_x o valor do comprimento AC nesta situação.
- 2º - Abre-se a chave C_1 e fecha-se a C_2 . Desloca-se novamente o cursor C até que a leitura de G torne a se anular. Seja L_p o comprimento de AC nesta nova situação.

Supondo que em uma experiência foram obtidos os valores $\epsilon_p = 1,48 \text{ V}$, $L_p = 32,0 \text{ cm}$ e $L_x = 48,0 \text{ cm}$, determine o valor de ϵ_x .



Problema suplementar 13.

14. No circuito mostrado na figura deste problema, o gerador de f.e.m. $\epsilon = 10 \text{ V}$ tem resistência interna nula e a bateria, de f.e.m. ϵ' desconhecida, tem resistência interna $r' = 1,5 \Omega$. O fio AB é homogêneo e de seção reta constante. Sabendo-se que o amperímetro A não indica passagem de corrente em uma posição X tal que $BX = (2/5) AB$, determine o valor da f.e.m. ϵ' .



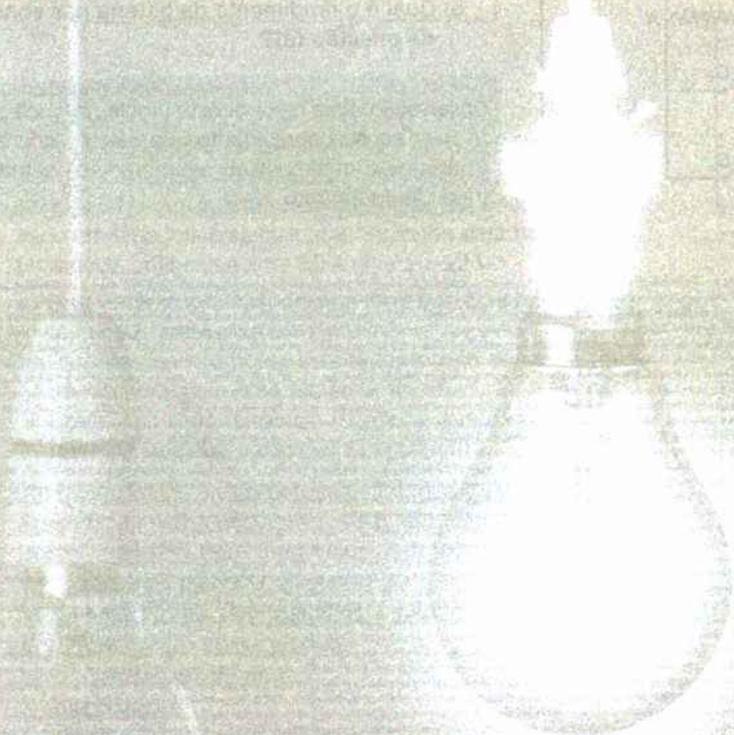
Problema suplementar 14.

15. Uma bateria, de f.e.m. ϵ e resistência interna r , está ligada a uma resistência externa R variável.
- a) Qual deve ser a relação entre R e r para que a potência dissipada na resistência externa seja máxima?
 - b) Qual é o rendimento da bateria nas condições da questão (a)?

Observação: Para resolver este problema, você poderá usar seus conhecimentos de cálculo diferencial (máximos e mínimos) ou relembrar seu estudo do trinômio do 2º grau.

UNIDADE 10

eletromagnetismo



capítulo 22

O campo magnético

1ª parte



Pekka Parvainen/SPL/Stock Photos

Aurora boreal (nos céus da região ártica), podendo-se ver também a Lua, Júpiter (ponto brilhante, no centro, à direita), Marte (no centro) e Saturno (pequeno ponto brilhante, mais abaixo, à direita). O belo espetáculo da aurora (boreal ou austral) é causado por partículas eletrizadas que se movimentam no campo magnético da Terra, como veremos neste capítulo.

22.1. Magnetismo

INTRODUÇÃO

As primeiras observações de fenômenos magnéticos são muito antigas. Acredita-se que estas observações foram realizadas pelos gregos, em uma cidade da Ásia, denominada Magnésia. Eles verificaram que existia, nesta região, um certo tipo de pedra que era capaz de atrair pedaços de ferro. Sabe-se atualmente que estas pedras, denominadas *ímãs naturais*, são constituídas por um certo óxido de ferro. O termo “magnetismo” foi, então, usado para designar o estudo das propriedades destes ímãs, em virtude do nome da cidade onde foram descobertos.



Mapa da região onde supostamente foram observados os primeiros fenômenos magnéticos.

Observou-se que um pedaço de ferro, colocado nas proximidades de um ímã natural, adquiria as mesmas propriedades deste ímã. Assim, foi possível obter ímãs não-naturais (ímãs artificiais) de várias formas e tamanhos, utilizando pedaços de ferro de formas e tamanhos variados.

Com o decorrer do tempo, várias outras propriedades dos ímãs foram sendo descobertas, algumas das quais descreveremos a seguir.

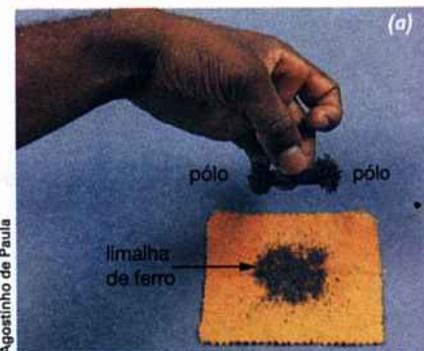
PÓLOS DE UM ÍMÃ

Verificou-se que os pedaços de ferro eram atraídos com maior intensidade por certas partes do ímã, as quais foram denominadas *pólos do ímã*. Se tomarmos, por exemplo, um ímã em forma de barra e distribuirmos limalha de ferro (pequenos pedaços de ferro) sobre ele, notaremos que a limalha se acumulará nas extremidades da barra (fig. 22-1), isto é, ela é atraída com maior intensidade para estas extremidades. Portanto, um ímã em forma de barra possui dois pólos, situados em suas extremidades.



Agostinho de Paula

Observe onde estão localizados os pólos desse ímã.



Agostinho de Paula

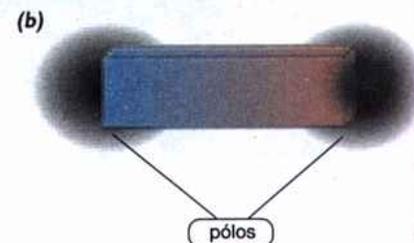


Fig. 22-1: Ilustração esquemática. Um ímã em forma de barra possui dois pólos, situados em suas extremidades.

Suspendendo-se um ímã em forma de barra, de modo que possa girar livremente em torno de seu centro, observa-se que ele se orienta sempre ao longo de uma mesma direção (fig. 22-2-a). Tal direção coincide aproximadamente com a direção norte-sul da Terra. Esta propriedade dos ímãs foi utilizada na construção das bússolas magnéticas (fig. 22-2-b), as quais tornaram possível a realização de extensas viagens marítimas desde tempos muito remotos. Como você sabe, estes instrumentos continuam sendo amplamente empregados até nossos dias.

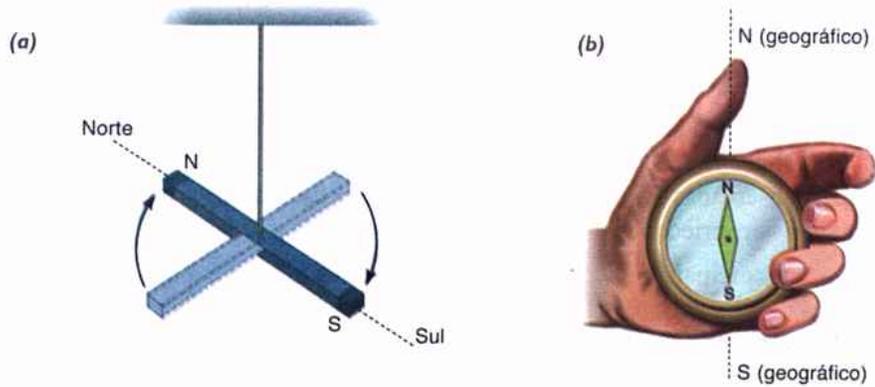
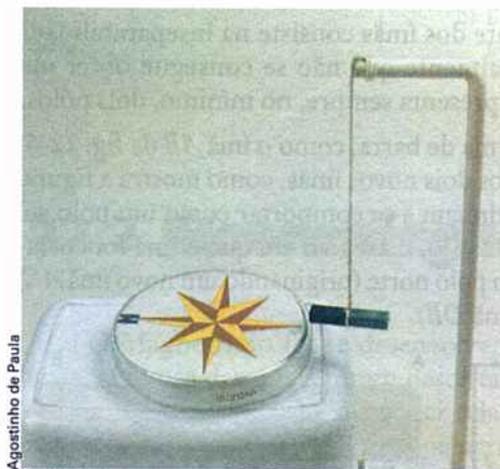


Fig. 22-2: Um ímã (ou agulha magnética) suspenso orienta-se na direção norte-sul. Ilustração esquemática.

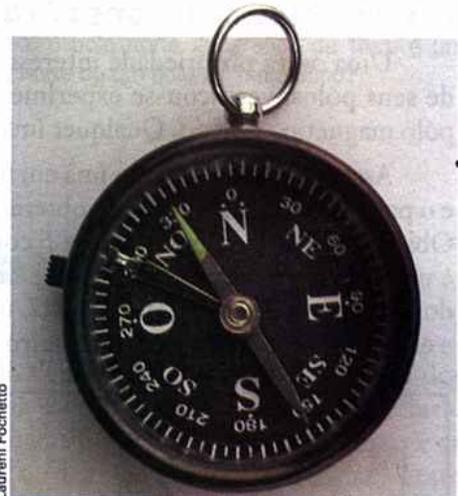
Os pólos de um ímã recebem as denominações de “pólo norte magnético” e “pólo sul magnético”, de acordo com a seguinte convenção:

pólo norte de um ímã é aquela extremidade que, quando o ímã pode girar livremente, aponta para o norte geográfico da Terra. A extremidade que aponta para o sul geográfico da Terra é o pólo sul do ímã (fig. 22-2).

Um ímã suspenso livremente é orientado na direção norte-sul pelo campo magnético terrestre.



Agostinho de Paula



Laurení Fochetto

É possível que você já tenha observado experimentalmente que, ao tentarmos aproximar o pólo norte de um ímã do pólo norte de outro ímã, notaremos que haverá uma força magnética de repulsão entre estes pólos (fig. 22-3-a). Do mesmo modo, observaremos que há uma força de repulsão entre os pólos sul de dois ímãs (fig. 22-3-b), enquanto entre o pólo norte de um ímã e o pólo sul de outro haverá

uma força de atração magnética (fig. 22-3-c). Em resumo: *pólos magnéticos de mesmo nome se repelem e pólos magnéticos de nomes contrários se atraem.*

A TERRA É UM GRANDE ÍMÃ

Durante muitos anos, vários filósofos e cientistas tentaram encontrar uma explicação para o fato de um ímã (como a agulha magnética de uma bússola) se orientar na direção norte-sul da Terra. Entretanto, a explicação que hoje sabemos ser correta só veio a ser formulada no século XVII pelo médico inglês W. Gilbert, cientista a cujos trabalhos no campo da Eletricidade já nos referimos no capítulo 17. Em sua obra, denominada *De magnete*, publicada em 1600, Gilbert descreve um grande número de propriedades dos ímãs, observadas experimentalmente por ele, e formula hipóteses procurando explicar estas propriedades.

Uma das principais idéias que ele apresenta em sua obra é a de que a orientação de uma agulha magnética se deve ao fato de a Terra se comportar como um grande ímã. Segundo Gilbert, o pólo norte geográfico da Terra seria também um pólo magnético que atrai a extremidade norte da agulha magnética. De modo semelhante, o pólo sul geográfico da Terra se comporta como um pólo magnético que atrai o pólo sul da agulha magnética. Em virtude destas forças de atração, a agulha magnética (ou qualquer outro ímã em forma de barra) tende a se orientar ao longo da direção norte-sul.

É fácil perceber, de acordo com esta explicação, que o pólo norte geográfico da Terra é um pólo sul magnético (pois ele atrai o pólo norte da agulha) e o pólo sul geográfico é um pólo norte magnético. Então, para efeitos magnéticos, podemos imaginar a Terra representada por um grande ímã, como se procura ilustrar na fig. 22-4.

INSEPARABILIDADE DOS PÓLOS

Uma outra propriedade interessante dos ímãs consiste na inseparabilidade de seus pólos: verificou-se experimentalmente que não se consegue obter um pólo magnético isolado. Qualquer ímã apresenta sempre, no mínimo, dois pólos.

Assim, se tomarmos um ímã em forma de barra, como o ímã *AB* da fig. 22-5, e o partirmos em dois pedaços, obteremos dois novos ímãs, como mostra a figura. Observe que as extremidades *A* e *B* continuam a se comportar como um pólo sul e um pólo norte, respectivamente. Entretanto, na região em que o ímã foi cortado, aparecerão dois novos pólos: em *C* um pólo norte (originando um novo ímã *AC*) e em *D* um pólo sul (originando outro ímã *DB*).

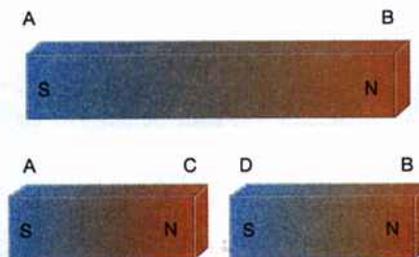


Fig. 22-5: É impossível obter um pólo magnético isolado.

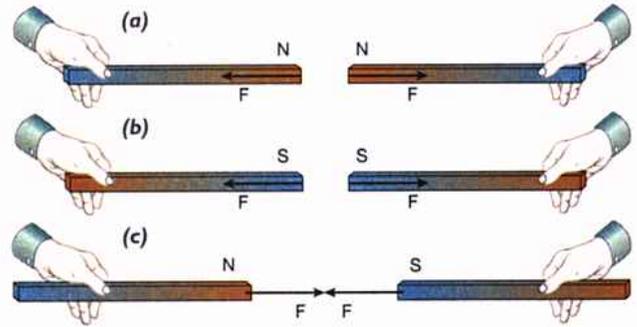


Fig. 22-3: Pólos magnéticos de mesmo nome se repelem e de nomes contrários se atraem.

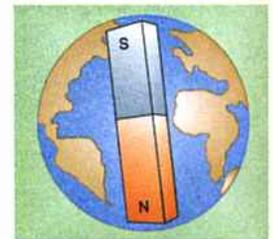
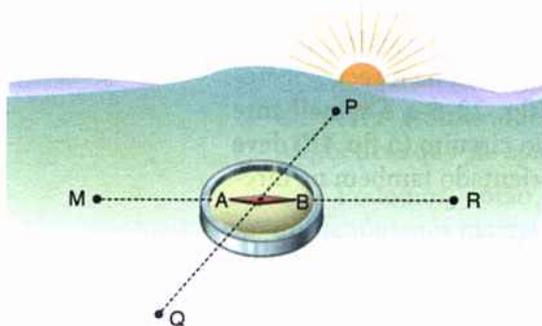


Fig. 22-4: O norte geográfico da Terra é um pólo sul magnético e o sul geográfico é um pólo norte magnético.

os de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Sabendo-se que o Sol mostrado na figura deste exercício está nascendo, responda:
 - Dos pontos *M*, *P*, *Q* e *R*, qual deles indica o sentido do norte geográfico?
 - Observe os pontos *A* e *B* indicados na bússola e diga qual deles é o pólo norte e qual é o pólo sul da agulha magnética.

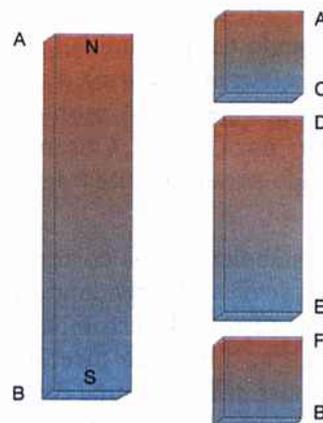


Exercício 1.

- Suponha que você possua alguns ímãs nos quais assinalou quatro pólos com as letras *A*, *B*, *C* e *D*. Você verifica que:
 - o pólo *A* repele o pólo *B*;
 - o pólo *A* atrai o pólo *C*;
 - o pólo *C* repele o pólo *D*;

e sabe que o pólo *D* é um pólo norte. Nestas condições, você pode concluir que *B* é um pólo norte ou um pólo sul?

- Um ímã *AB* é partido em três pedaços, originando os novos ímãs *AC*, *DE* e *FB* (veja a figura deste exercício). Indique, em uma cópia da figura, o nome (norte ou sul) de cada um dos pólos *A*, *C*, *D*, *E*, *F* e *B* assim obtidos.



Exercício 3.

- O pólo norte de uma agulha magnética é atraído ou repellido pelo pólo norte geográfico da Terra?
 - Então, o pólo norte geográfico da Terra é um pólo norte ou um pólo sul magnético?

22.2. Eletromagnetismo

O Magnetismo foi se desenvolvendo com o estudo das propriedades dos ímãs, algumas das quais foram descritas na seção anterior. Não se suspeitava, então, que pudesse existir qualquer relação entre os fenômenos magnéticos e os fenômenos elétricos. Em outras palavras, o Magnetismo e a Eletricidade eram considerados dois ramos da Física totalmente independentes e distintos um do outro.

Entretanto, no início do século XIX, um fato notável determinou uma mudança radical neste ponto de vista. Este fato, observado pelo professor dinamarquês H. C. Oersted, veio mostrar que há uma íntima relação entre a Eletricidade e o Magnetismo, ao contrário do que se pensava até então.

Hans Christian Oersted (1777-1851).

Físico dinamarquês que em 1806 se tornou professor da Universidade de Copenhague, onde desenvolveu várias pesquisas no campo da Física e da Química. Em um ensaio publicado em 1813, previu que deveria existir uma ligação entre a Eletricidade e o Magnetismo. Em 1820, durante uma aula, descobriu que uma agulha magnética é desviada quando colocada nas proximidades de um condutor que conduz uma corrente elétrica, assim confirmando experimentalmente sua previsão. Oersted foi professor e conferencista conceituado, dedicando-se ainda a escrever alguns artigos sobre filosofia. Em 1824, fundou uma sociedade para divulgar os conhecimentos científicos entre o povo.



A EXPERIÊNCIA DE OERSTED

Em 1820, trabalhando em seu laboratório, Oersted montou um circuito elétrico, tendo nas proximidades uma agulha magnética. Não havendo corrente no circuito (circuito aberto), a agulha magnética se orientava na direção norte-sul, como já sabemos. A montagem apresentada na fig. 22-6-a é semelhante àquela feita por Oersted. Observe que um dos ramos do circuito (o fio AB) deve ser colocado paralelamente à agulha, isto é, deve ser orientado também na direção norte-sul.

Ao estabelecer uma corrente no circuito, Oersted observou que a agulha magnética se desviava, tendendo a se orientar em uma direção perpendicular ao fio AB (fig. 22-6-b). Interrompendo-se a corrente, a agulha retornava à sua posição inicial, ao longo da direção norte-sul. Estas observações realizadas por Oersted mostravam que uma corrente elétrica podia atuar como se fosse um ímã, provocando desvios em uma agulha magnética. Verificava-se, assim, pela primeira vez, que existe uma relação entre a Eletricidade e o Magnetismo: *uma corrente elétrica é capaz de produzir efeitos magnéticos.*

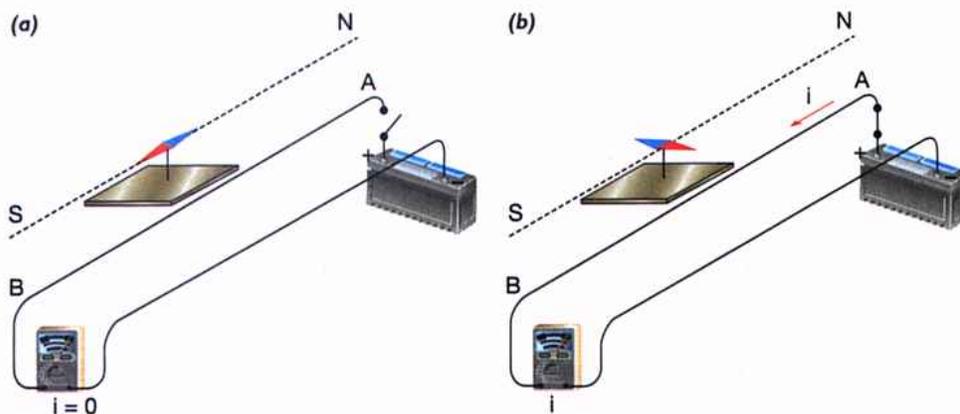


Fig. 22-6: Uma agulha magnética colocada nas proximidades de um fio que conduz uma corrente elétrica tende a se posicionar perpendicularmente ao fio. Ilustração esquemática.

Percebendo a importância de sua descoberta, Oersted divulgou o resultado de suas observações, que imediatamente atraiu a atenção de grandes cientistas da época. Alguns deles passaram a desenvolver pesquisas relacionadas com o fenômeno, destacando-se o trabalho de Ampère. Em pouco tempo, graças a estas pesquisas, verificou-se que qualquer fenômeno magnético era provocado por correntes elétricas, isto é, conseguia-se, de modo definitivo, a unificação do Magnetismo e da Eletricidade, originando o ramo da Física atualmente denominado Eletromagnetismo.

força magnética

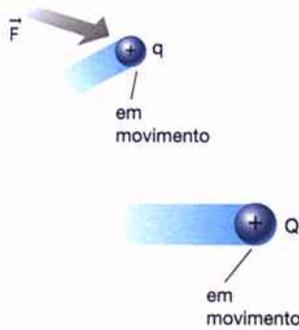


Fig. 22-7: Ilustração esquemática. Quando duas cargas elétricas estão em movimento, manifesta-se entre elas, além da força elétrica, uma força magnética.

O FATO BÁSICO DO ELETROMAGNETISMO

Como resultado dos estudos que acabamos de citar, foi possível estabelecer o princípio básico de todos os fenômenos magnéticos: *quando duas cargas elétricas estão em movimento, aparece entre elas uma força que é denominada força magnética.*

Já sabemos que quando duas cargas elétricas estão em repouso, existe entre elas uma força, denominada força eletrostática, que foi estudada no capítulo 17 (Lei de Coulomb). Quando as duas cargas estão se movendo, além da força eletrostática, aparece entre elas uma nova força, que é a força magnética. Por exemplo: na fig. 22-7, a carga Q em movimento exerce sobre a carga q , também em movimento, além da força eletrostática, uma força magnética \vec{F} , como está indicado na figura.

Todas as manifestações de fenômenos magnéticos são explicadas através desta força entre cargas em movimento. Assim, o desvio da agulha na experiência de Oersted é devido à existência desta força; é também ela a responsável pela orientação da agulha magnética na direção norte-sul; a atração e repulsão entre os pólos de ímãs é ainda uma consequência desta força magnética. Conforme veremos no capítulo seguinte, existem cargas em movimento na estrutura atômica de um ímã que são responsáveis pelas propriedades magnéticas que ele apresenta.

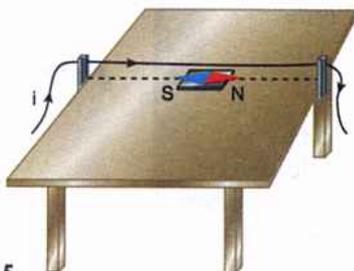
Podemos, então, salientar o seguinte fato básico, que é o fundamento dos fenômenos magnéticos:

quando duas cargas elétricas estão em movimento, manifesta-se entre elas, além da força eletrostática, uma outra força, denominada força magnética.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

5. Na figura deste exercício, uma corrente de grande intensidade está passando por um fio, situado acima de uma agulha magnética. Há um erro nesta figura. Qual é este erro?



Exercício 5.

6. Uma pessoa está usando uma bússola magnética para se orientar. Entretanto, existe nas proximidades um fio no qual passa uma corrente contínua de grande intensidade. Você acha que a bússola indicará à pessoa a orientação correta?
7. Um fio condutor de eletricidade está embutido em uma parede. Uma pessoa deseja saber se existe, ou não, uma corrente contínua passando pelo fio. Explique como ela poderá verificar este fato usando uma agulha magnética.
8. Considere duas cargas elétricas Q_1 e Q_2 , próximas uma da outra. Diga se existirá entre elas uma força eletrostática e uma força magnética em cada um dos seguintes casos:
- Q_1 e Q_2 estão ambas em repouso.
 - Q_1 está em movimento e Q_2 está em repouso.
 - Q_1 e Q_2 estão ambas em movimento.

22.3. Campo magnético

O QUE SE ENTENDE POR CAMPO MAGNÉTICO

Vimos, na secção anterior, que uma carga elétrica em movimento exerce uma força magnética sobre outra carga que também esteja se movendo (fig. 22-7). Podemos descrever este fato de uma outra maneira, dizendo que uma carga em movimento cria no espaço em torno dela um *campo magnético*, o qual atua sobre a outra carga também em movimento. Como você deve estar lembrado, um procedimento semelhante foi usado no capítulo 18, quando estudamos o *campo elétrico*. Dizíamos, naquele capítulo, ao analisarmos a interação eletrostática entre duas cargas Q e q , que a carga Q cria um campo elétrico, o qual exerce uma força eletrostática sobre q .

Assim, na fig. 22-7, podemos dizer que a carga Q , em movimento, cria um campo magnético no espaço em torno dela e este campo atua sobre a carga q , também em movimento. Portanto, dentro deste ponto de vista, a força magnética em q é devida à existência do campo magnético criado por Q .

Podemos, pois, destacar:

uma carga em movimento cria, no espaço em torno dela, um campo magnético que atuará sobre outra carga, também em movimento, exercendo sobre ela uma força magnética.

Deve-se observar então que, se existir uma corrente elétrica passando por um fio, haverá um campo magnético no espaço em torno deste fio, pois uma corrente elétrica, como sabemos, é constituída por cargas elétricas em movimento. Da mesma forma, no espaço em torno de um ímã também existe um campo magnético, pois, como já dissemos, no interior do ímã temos cargas elétricas em movimento que estabelecem este campo.

O VETOR CAMPO MAGNÉTICO

Consideremos uma região do espaço onde existe um campo magnético. Este campo pode ter sido criado tanto por uma corrente em um fio quanto por um ímã.

De modo semelhante ao que foi feito para o campo elétrico, vamos definir um vetor, representado por \vec{B} e denominado *vetor campo magnético* (ou *vetor indução magnética*), que será usado para caracterizar o campo magnético em cada ponto do espaço.

- 1) *Direção e sentido de \vec{B}* — O ímã cujo pólo norte está mostrado na fig. 22-8 cria um campo magnético no espaço em torno dele. Colocando-se no ponto P_1 uma pequena agulha magnética, o campo magnético aí existente atuará sobre as cargas móveis desta agulha, fazendo com que ela tome uma certa orientação. A direção do vetor campo magnético \vec{B}_1 neste ponto é, por definição, a direção na qual a agulha se orienta e o seu sentido é o

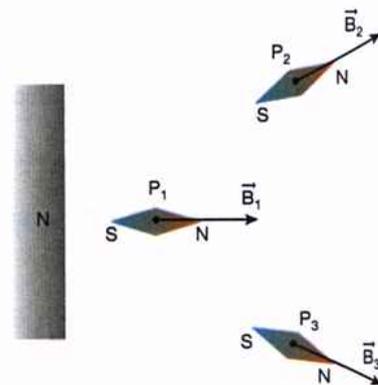


Fig. 22-8: O campo magnético \vec{B} em um ponto está orientado na direção e sentido sul-norte de uma agulha magnética colocada neste ponto.

Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP



sentido para o qual aponta o pólo norte da agulha. Observe então, na fig. 22-8, o vetor \vec{B}_1 que representa o campo magnético existente em P_1 .

De maneira análoga podemos colocar pequenas agulhas magnéticas nos pontos P_2 , P_3 , etc., e assim obter a direção e o sentido dos vetores campo magnético \vec{B}_2 , \vec{B}_3 , etc., em cada um destes pontos (veja a fig. 22-8).

A agulha magnética indica, em cada posição, a direção e o sentido do campo magnético criado pelo ímã.

2) *Módulo do vetor \vec{B}* — Suponhamos que no ponto P mostrado na fig. 22-9 exista um campo magnético \vec{B} com a direção e o sentido indicados na figura (que já sabemos como determinar). Se uma partícula, eletrizada com uma carga positiva q , for lançada de maneira a passar no ponto P com uma velocidade \vec{v} , sabemos que o campo magnético exercerá sobre esta carga uma força magnética \vec{F} . Verifica-se que esta força é perpendicular ao plano determinado pelos vetores \vec{v} e \vec{B} , como está mostrado na fig. 22-9.

Realizando medidas cuidadosas, os cientistas verificaram que o módulo da força magnética \vec{F} depende do valor da carga q , do módulo da velocidade \vec{v} e do ângulo θ formado pelos vetores \vec{v} e \vec{B} (veja a fig. 22-9), tendo sido obtidas as seguintes relações:

$$F \propto q \quad F \propto v \quad F \propto \text{sen } \theta$$

Foi possível, então, concluir que

$$F \propto qv \text{ sen } \theta \quad \text{onde} \quad \frac{F}{qv \text{ sen } \theta} = \text{constante}$$

O valor desta constante foi tomado, por definição, como sendo o módulo de \vec{B} no ponto P , isto é,

$$\frac{F}{qv \text{ sen } \theta} = B \quad \text{ou} \quad F = Bqv \text{ sen } \theta$$

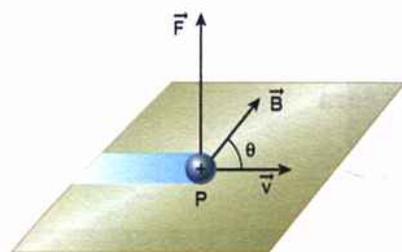


Fig. 22-9: Esquema da força \vec{F} que o campo \vec{B} provoca na carga q , lançada no campo com velocidade \vec{v} .

Deve-se observar que o valor de \vec{B} é constante para um dado ponto, mas para pontos diferentes teremos em geral valores diferentes de \vec{B} . Em outras palavras, o módulo do campo magnético é bem determinado para um dado ponto, podendo, entretanto, apresentar valores diferentes em diferentes pontos do espaço (como vimos, o mesmo ocorre com a intensidade de um campo elétrico).

DIREÇÃO E SENTIDO DA FORÇA MAGNÉTICA

Na fig. 22-9 vimos que a direção da força que um campo magnético exerce sobre uma carga em movimento é perpendicular ao plano determinado pelos vetores \vec{v} e \vec{B} . Logo, a força magnética \vec{F} é perpendicular a cada um destes vetores, isto é,

$$\vec{F} \perp \vec{v} \quad \text{e} \quad \vec{F} \perp \vec{B}$$

Quanto ao sentido da força \vec{F} , existem várias regras práticas que nos permitem determiná-lo. Vamos descrever uma delas, denominada “regra do tapa”, com a qual trabalharemos em nosso curso.

De acordo com esta regra, para obtermos o sentido da força magnética que atua em uma carga positiva em movimento, devemos proceder da seguinte maneira: dispomos a mão direita aberta da maneira mostrada na fig. 22-10, com o dedo polegar dirigido ao longo do vetor \vec{v} e os demais dedos orientados ao longo do campo magnético \vec{B} ; o sentido de \vec{F} será aquele para onde fica voltada a palma da mão, isto é, o sentido do movimento que deveria ser feito para dar um tapa com a palma desta mão (veja a fig. 22-10).

Se a carga lançada no campo magnético for negativa, o sentido da força será contrário àquele da força que atua na carga positiva. Neste caso, você poderá ainda usar a regra do tapa, mas não deverá se esquecer de inverter o sentido indicado por ela.

Resumindo o que estudamos sobre a força magnética, temos:

quando uma partícula eletrizada positivamente com uma carga q passa com uma velocidade \vec{v} em um ponto onde existe um campo magnético \vec{B} , ela fica sob a ação de uma força magnética \vec{F} com as seguintes características:

módulo: $F = Bqv \sin \theta$, onde θ é o ângulo de \vec{v} com \vec{B}

direção: \vec{F} é perpendicular a \vec{v} e \vec{B}

sentido: dado pela regra do tapa, ilustrada na fig. 22-10

Se a carga q for negativa, o sentido da força magnética será contrário àquele que é observado para a carga positiva.

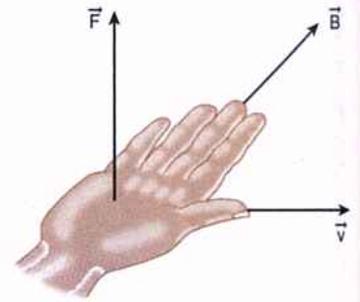
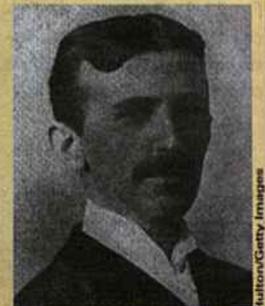


Fig. 22-10: Disposição da mão direita para aplicação da regra do tapa.

Nikola Tesla (1856-1943).

Nasceu na Iugoslávia, tendo sido educado na Universidade Técnica da Áustria e posteriormente na Universidade de Praga. Em 1883, trabalhando na Companhia Edison, em Paris, construiu o primeiro motor elétrico. Em 1885, tendo emigrado para os Estados Unidos, Tesla patenteou suas invenções: dínamo de corrente alternada, transformador e motores, estabelecendo, então, seu próprio laboratório. Daí por diante Tesla, que era pessoa muito dinâmica, teve oportunidade de desenvolver várias outras invenções, entre elas a bobina de Tesla, um barco guiado por controle remoto e outros dispositivos controlados a distância.



COMENTÁRIOS

1) Da definição do módulo do vetor \vec{B}

$$B = \frac{F}{qv \sin \theta}$$

podemos obter sua unidade de medida no S.I. Teremos, evidentemente, a partir desta expressão e lembrando que $\sin \theta$ é adimensional (não possui unidades):

$$1 \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot (\text{m/s})} = 1 \frac{\text{N}}{(\text{C/s}) \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

Esta unidade é denominada 1 tesla = 1 T, em homenagem ao cientista iugoslavo Nikola Tesla, responsável por importantes descobertas tecnológicas no campo do Eletromagnetismo. Por razões que poderão ser entendidas quando o capítulo 24 for estudado, esta unidade costuma também ser denominada 1 weber/m² = 1 Wb/m². Portanto:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

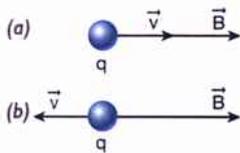
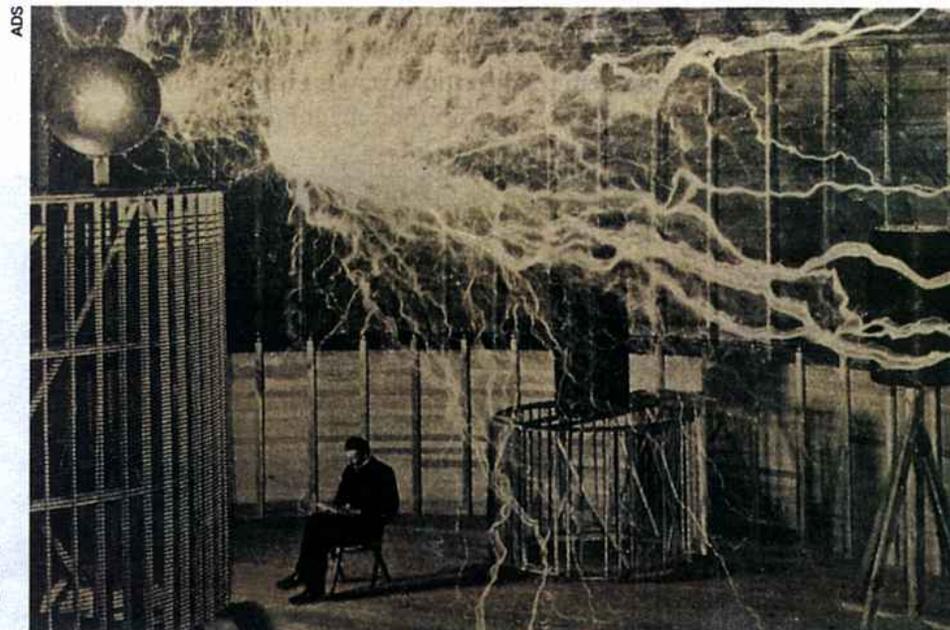


Fig. 22-11: Ilustração esquemática. Um campo magnético não atua em uma carga que se move paralelamente a \vec{B} .

2) Suponha que uma carga q seja lançada em um campo magnético de tal modo que a direção de sua velocidade \vec{v} coincida com a direção de \vec{B} . Se o sentido de \vec{v} for o mesmo de \vec{B} (fig. 22-11-a), teremos $\theta = 0$ e, se \vec{v} tiver sentido contrário a \vec{B} (fig. 22-11-b), teremos $\theta = 180^\circ$. Em ambos os casos tem-se $\sin \theta = 0$ e a expressão $F = Bqv \sin \theta$ nos mostra que a força magnética sobre a partícula será nula. Portanto, um campo magnético não atua em uma carga quando ela está se movendo paralelamente ao vetor \vec{B} .

3) Sabemos que uma agulha magnética, colocada em qualquer ponto da superfície terrestre, orienta-se na direção norte-sul. Assim, podemos concluir que existe um campo magnético em todos os pontos da superfície da Terra, orientado do sul geográfico para o norte geográfico. Este campo, denominado campo magnético terrestre, existe em virtude de a Terra se comportar como um grande ímã.



Tesla lendo calmamente sob as centelhas que saltam de dispositivos elétricos construídos por ele mesmo.

O valor do campo magnético criado pela Terra é pequeno, comparado com o campo magnético da maioria dos ímãs com os quais lidamos normalmente. O campo magnético terrestre tem módulos diferentes em diferentes regiões, apresentando um valor em torno de 10^{-5} tesla. Apesar de não ser muito intenso, não devemos nos esquecer de que o campo magnético da Terra é suficiente para atuar sobre as agulhas magnéticas, orientando-as na direção norte-sul.

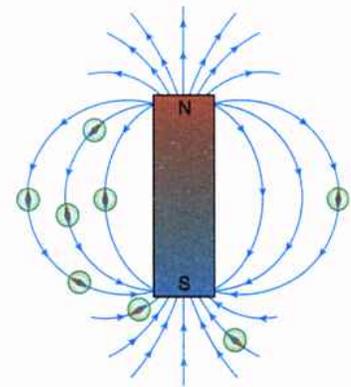
LINHAS DE INDUÇÃO

De maneira semelhante ao que foi feito no capítulo 18, quando representamos o campo elétrico por meio de linhas de força, também se usa traçar linhas para representar o campo magnético. Estas linhas, denominadas *linhas de indução*, devem ser traçadas de tal modo que o vetor \vec{B} seja sempre tangente a elas em qualquer um de seus pontos. Além disso, nas regiões onde o campo magnético é mais intenso, as linhas de indução devem ser traçadas mais próximas umas das outras. Lembre-se de que estas mesmas convenções eram adotadas para se traçar as linhas de força de um campo elétrico.

Na fig. 22-12-a mostramos as linhas de indução do campo magnético criado por um ímã em forma de barra. Deve-se observar que, ao contrário das linhas de força, as linhas de indução são fechadas: elas emergem do pólo norte, penetram no pólo sul e se fecham passando pelo interior do ímã. Observe, ainda, que as linhas de indução estão mais juntas umas das outras nas regiões próximas aos pólos do ímã, indicando que o campo magnético é mais intenso nestas regiões.

É possível obter experimentalmente a configuração das linhas de indução de um campo magnético espalhando-se limalha de ferro nas regiões onde o campo atua. Cada uma das pequenas partículas de ferro da limalha se orienta na direção do vetor \vec{B} e, assim, em conjunto, elas adquirem a configuração das linhas de indução. A fig. 22-12-b é uma fotografia que mostra as linhas de indução de um ímã em forma de barra, obtidas com o auxílio de limalha de ferro.

Se o vetor \vec{B} apresentar, em todos os pontos, o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido, dizemos que o campo magnético é *uniforme*. Um ímã



A direção e o sentido das linhas de indução de um campo magnético são indicados pela orientação de agulhas magnéticas colocadas em diversos pontos do campo.

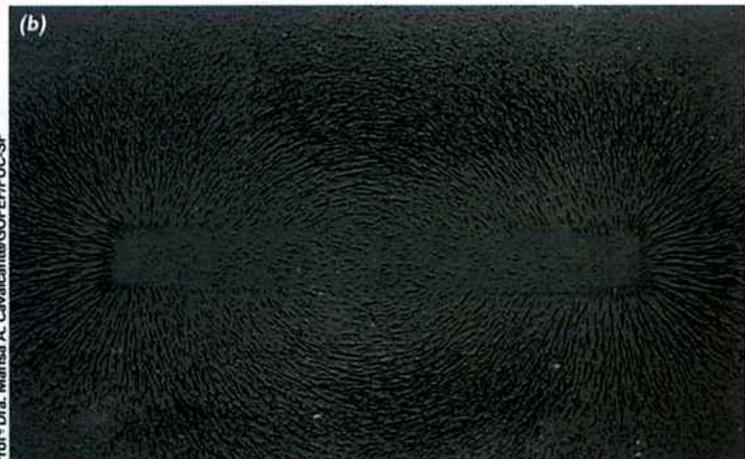
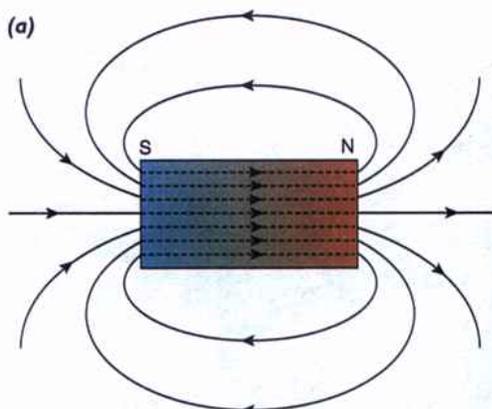
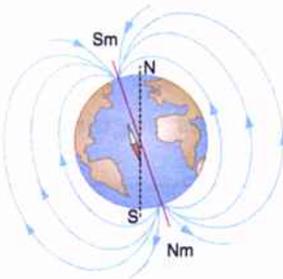


Fig. 22-12: Esquema das linhas de indução do campo magnético criado por um ímã em forma de barra.



Representação das linhas de indução do campo magnético da Terra. Observe que os polos magnéticos (S_m e N_m) do grande ímã-Terra não coincidem exatamente com os polos geográficos (N e S) do nosso planeta.

com a forma mostrada na fig. 22-13 nos fornece um campo magnético praticamente uniforme na região entre seus polos.

Observe que, para isto, os polos do ímã devem ser planos paralelos e separados por uma distância não muito grande em relação aos seus tamanhos. As linhas de indução de um campo magnético uniforme são paralelas e igualmente espaçadas, como aquelas desenhadas na região situada entre os polos do ímã mostrado na fig. 22-13.

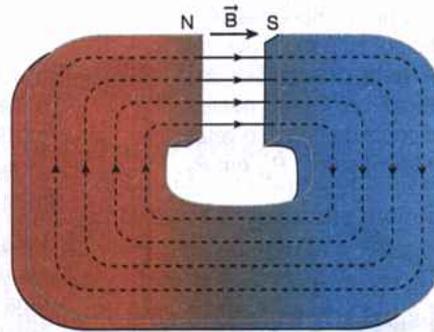


Fig. 22-13: Entre os polos do ímã mostrado, o campo magnético é praticamente uniforme.

Exemplo

Sabe-se que no ponto P da fig. 22-14-a existe um campo magnético \vec{B} na direção da reta CD. Quando um próton passa neste ponto P com uma velocidade $v = 2,0 \times 10^6$ m/s, mostrada na figura, atua sobre ele uma força magnética $F = 4,8 \times 10^{-15}$ N, perpendicular ao plano da folha do desenho e penetrando nela.

a) Determine o sentido do campo magnético \vec{B} existente no ponto P.

Para determinar o sentido de \vec{B} usaremos a regra do tapa. Isto está mostrado na fig. 22-14-b, em que o polegar da mão direita aponta ao longo do vetor \vec{v} e a palma da mão está voltada na direção e sentido da força (penetrando no papel). Nestas condições, os demais dedos indicarão o sentido do campo magnético. Logo, o vetor \vec{B} tem o sentido de P para D, como está mostrado na fig. 22-14-b.

b) Determinar o módulo de \vec{B} .

A expressão $F = Bqv \sin \theta$ nos permitirá determinar o módulo de \vec{B} , isto é,

$$B = \frac{F}{qv \sin \theta}$$

Observando, na fig. 22-14, que \vec{v} é perpendicular a \vec{B} , temos $\theta = 90^\circ$ e, então, $\sin \theta = 1$. Substituindo os valores $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C (carga do próton), $v = 2,0 \times 10^6$ m/s e $F = 4,8 \times 10^{-15}$ N (todos já estão expressos no S.I.), virá:

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{4,8 \times 10^{-15}}{1,6 \times 10^{-19} \times 2,0 \times 10^6} \quad \text{donde} \quad B = 1,5 \times 10^{-2} \text{ T}$$

c) Suponha, agora, que um elétron seja lançado de modo a passar pelo ponto P com uma velocidade $v = 1,0 \times 10^7$ m/s, perpendicular à folha de papel e saindo dela. Determinar o módulo da força magnética que atuará no elétron.

O módulo desta força será dado por $F = Bqv \sin \theta$. Deve-se observar que, neste caso, temos também $\theta = 90^\circ$, pois \vec{v} é perpendicular a \vec{B} , uma vez que \vec{B} está situado no plano da folha. O valor da carga do elétron é $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C e como $v = 1,0 \times 10^7$ m/s, teremos (lembre-se de que já determinamos o valor de \vec{B} no ponto P):

$$F = Bqv = 1,5 \times 10^{-2} \times 1,6 \times 10^{-19} \times 1,0 \times 10^7 \quad \text{donde} \quad F = 2,4 \times 10^{-14} \text{ N}$$

d) Na questão anterior, determinar a direção e o sentido da força que atua no elétron.

Para tanto, devemos usar novamente a regra do tapa: o polegar da mão direita orientado ao longo de \vec{v} (saindo da folha de papel) e os demais dedos apontando no sentido de \vec{B} (fig. 22-15). Vemos que, assim, a palma da mão direita está voltada para o lado esquerdo da figura. Como a carga do elétron é negativa, concluímos que atuará sobre ele uma força \vec{F} voltada para a direita, como mostra a fig. 22-15 (observe que a direção de \vec{F} é perpendicular a \vec{v} e \vec{B} , estando, portanto, no plano da folha de papel).

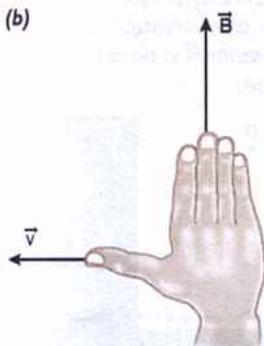
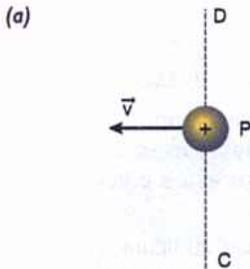


Fig. 22-14: Esquema para o exemplo da seção 22.3.

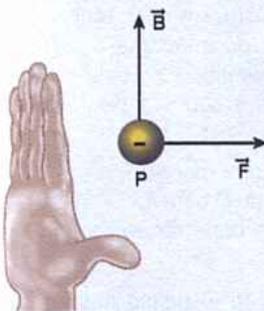
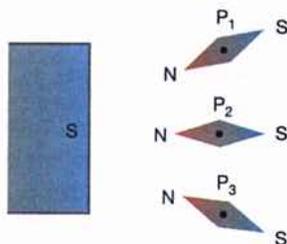


Fig. 22-15: Esquema para o exemplo da seção 22.3.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

9. Nos pontos P_1 , P_2 e P_3 existe um campo magnético criado pelo ímã cujo pólo sul está mostrado na figura deste exercício. Observe as orientações das pequenas agulhas magnéticas colocadas nestes pontos e desenhe, em uma cópia da figura, o vetor que representa o campo magnético em P_1 , em P_2 e em P_3 .



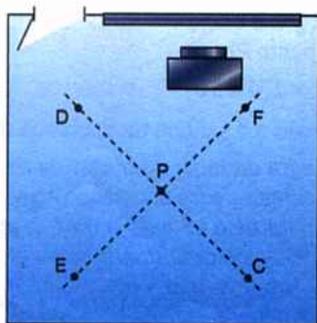
Exercício 9.

10. A figura deste exercício apresenta algumas linhas de indução do campo magnético terrestre. Mostre, em uma cópia da figura, o sentido destas linhas e responda: no pólo norte geográfico elas estão entrando na superfície da Terra ou saindo dela? Explique.



Exercício 10.

11. Suponha que no chão de uma sala estejam traçadas duas linhas perpendiculares, CD e EF , sendo que EF indica a direção oeste-leste (veja a figura deste exercício). Desenhe, em uma cópia da figura, o vetor que representa o campo magnético da Terra no ponto P .



Exercício 11.

12. Uma partícula é lançada em um campo magnético uniforme com uma velocidade \vec{v} , formando um ângulo θ com o vetor \vec{B} . Diga qual deve ser o valor de θ para que a força magnética na partícula seja:

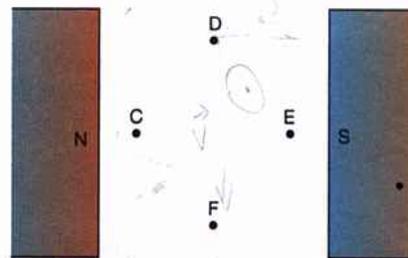
- a) Nula.
b) Máxima.

13. Uma partícula, de carga $q = 2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, é lançada em um campo magnético uniforme $B = 0,30 \text{ T}$, com uma velocidade $v = 5,0 \times 10^3 \text{ m/s}$, que forma um ângulo θ com \vec{B} . Calcule o valor da força magnética \vec{F} que atuará na partícula supondo que o valor de θ seja:

- a) 0°
b) 30°
c) 90°
d) 180°

14. Considere um ímã de pólos planos e paralelos, como mostra a figura deste exercício. Supondo que a distância entre estes pólos seja pequena:

- a) Desenhe, em uma cópia da figura, algumas linhas de indução do campo magnético criado pelo ímã no espaço entre os pólos.
b) Ao nos deslocarmos, neste campo, de C para D , para E e para F , o vetor \vec{B} varia ou permanece constante? Explique.



Exercício 14.

15. Na figura do exercício anterior, considere que uma partícula eletrizada positivamente tenha sido lançada entre os pólos do ímã. Use a regra da tapa para determinar a direção e o sentido da força magnética que atuará sobre a partícula em cada um dos seguintes casos:

- a) A partícula é lançada de C para E .
b) A partícula é lançada de D para F .
c) A partícula é lançada penetrando na folha de papel.

16. Responda às questões do exercício anterior supondo que a partícula lançada entre os pólos do ímã esteja eletrizada negativamente.

22.4. Movimento circular em um campo magnético



Fig. 22-16: Representação de vetores perpendiculares à folha de papel; em (a) penetrando e em (b) saindo da folha.

Freqüentemente trabalhamos com vetores perpendiculares a um certo plano que podem estar penetrando no plano ou saindo dele. Por exemplo: na secção anterior, encontramos situações nas quais ora um vetor, ora uma força, ora uma velocidade, ora um campo magnético, se apresentava perpendicular ao plano da folha de papel.

Nestas condições, os vetores costumam ser representados da maneira indicada na fig. 22-16. Em (a) está representado um vetor perpendicular ao plano da folha de papel e penetrando nela. Esta maneira de representar procura dar a idéia de uma flecha vista pela sua parte posterior, isto é, se afastando do leitor. Em (b) está representado um vetor saindo da folha de papel, isto é, procura-se dar a idéia da ponta de uma flecha que está voltada para o leitor.

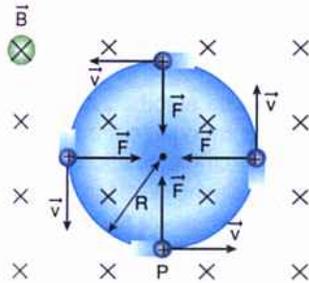


Fig. 22-17: Esquema de partícula eletrizada descrevendo trajetória circular no campo magnético.

CARGA LANÇADA COM \vec{v} PERPENDICULAR A \vec{B}

Na fig. 22-17 representamos um campo magnético uniforme \vec{B} usando a convenção que acabamos de descrever. Observe que este campo está penetrando na folha de papel.

Uma partícula eletrizada positivamente com uma carga q é lançada, do ponto P , no interior do campo, com uma velocidade \vec{v} . Como mostra a fig. 22-17, esta velocidade, estando no plano do papel, é perpendicular ao campo magnético, isto é, o vetor \vec{v} é perpendicular ao vetor \vec{B} .

Usando a regra do tapa, verifica-se que a força magnética \vec{F} que atua sobre a partícula no ponto P tem o sentido mostrado na figura. Como sabemos, esta força é sempre perpendicular ao vetor \vec{v} . Então, a força \vec{F} provocará uma modificação na direção da velocidade da partícula sem, entretanto, alterar o seu módulo. Assim, a partícula descreverá uma trajetória curva e a força magnética atuará continuamente sobre ela, mantendo-se sempre perpendicular à sua velocidade. Como consequência disto, a trajetória da partícula será uma circunferência, isto é, o movimento desta partícula, dentro do campo magnético (sob a ação apenas da força magnética), será um *movimento circular uniforme* (fig. 22-17).

Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

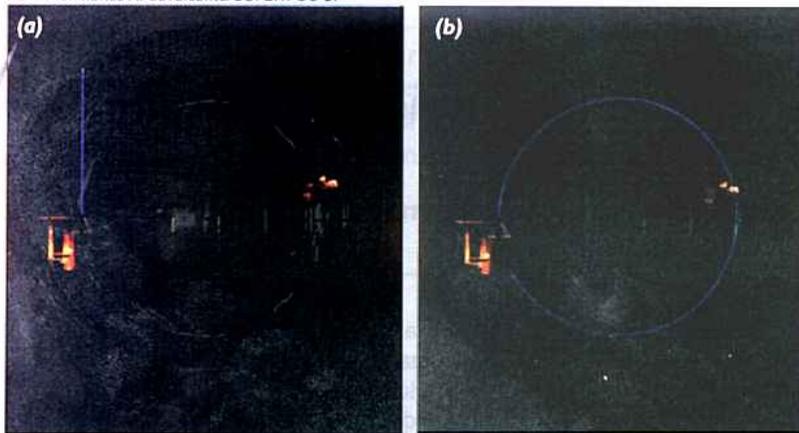


Fig. 22-18: Feixe de elétrons lançados por um canhão eletrônico. Em (a), na ausência do campo magnético e, em (b), sob a ação do campo magnético.

As fotografias apresentadas na fig. 22-18 confirmam experimentalmente o que acabamos de afirmar. Em (a) vemos um feixe de elétrons, lançados verticalmente para cima por um dispositivo especial denominado "canhão eletrônico". Aplicando-se, na região onde existe o feixe, um campo magnético uniforme, perpendicular ao plano da fotografia, o feixe se curva e os elétrons passam a descrever um movimento circular, como mostra a fig. 22-18-b.

RAIO DA TRAJETÓRIA DESCRITA PELA CARGA

Podemos calcular facilmente o raio R da trajetória circular que a partícula eletrizada descreve dentro de um campo magnético uniforme. Para isto, basta observar que a força magnética \vec{F} proporciona a força centrípeta necessária para a partícula descrever o movimento circular. Então, podemos escrever:

$$F = m \frac{v^2}{R} \quad \text{onde } m \text{ é a massa da partícula.}$$

Por outro lado, sabemos que a força magnética é dada por $F = Bqv \sin \theta$ e, como neste caso tem-se $\theta = 90^\circ$ (pois \vec{v} é perpendicular a \vec{B}), virá

$$F = Bqv$$

Igualando estas duas expressões de F , teremos:

$$m \frac{v^2}{R} = Bqv \quad \text{donde} \quad \boxed{R = \frac{mv}{Bq}}$$

Este estudo que acabamos de fazer encontra uma importante aplicação na Física Moderna, que será descrita no Tópico Especial apresentado no final deste capítulo.

Exemplo

Suponha que o raio da trajetória descrita pelos elétrons na fig. 22-18 seja $R = 5,0$ cm. Sabendo-se que o módulo do campo magnético aplicado ao feixe é $B = 6,0 \times 10^{-4}$ T, determinar a velocidade com que os elétrons são emitidos pelo canhão eletrônico.

Esta velocidade é a mesma que os elétrons possuem ao descrever o movimento circular. Assim, da expressão

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad \text{vem} \quad v = \frac{BqR}{m}$$

Na tabela que se encontra no final deste volume, obtemos a carga q e a massa m do elétron:

$$q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \quad \text{e} \quad m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Teremos, então:

$$v = \frac{BqR}{m} = \frac{6,0 \times 10^{-4} \times 1,6 \times 10^{-19} \times 5,0 \times 10^{-2}}{9,1 \times 10^{-31}} \quad \text{donde} \quad v = 5,2 \times 10^6 \text{ m/s}$$

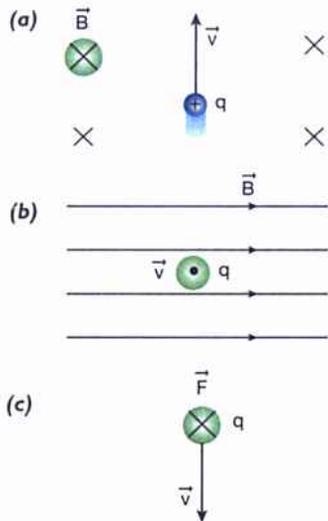
Como você pode perceber, a velocidade dos elétrons, nesta experiência, é muito elevada.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

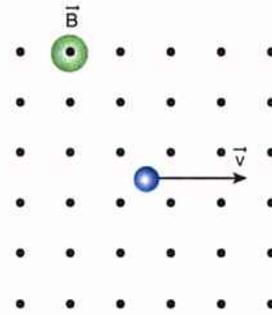
17. Analise os diagramas apresentados na figura deste exercício e responda:
- Qual é a direção e o sentido da força magnética que atua na carga q positiva, movendo-se com a velocidade \vec{v} no campo magnético \vec{B} mostrados no diagrama (a).
 - Qual é a direção e o sentido da força magnética que atua na carga q negativa, movendo-se com a velocidade \vec{v} no campo magnético \vec{B} mostrados no diagrama (b).
 - Qual é a direção e o sentido do campo magnético que exerce na carga positiva q a força

magnética \vec{F} mostrada no diagrama (c). Sabe-se que \vec{B} é perpendicular à velocidade \vec{v} da carga q .



Exercício 17.

18. Uma partícula eletrizada positivamente, colocada em um campo magnético uniforme, é lançada para a direita com uma velocidade \vec{v} , como mostra a figura deste exercício. Desenhe, em uma cópia da figura, a trajetória que a partícula descreverá.



Exercício 18.

19. No exercício anterior, desenhe a trajetória da partícula supondo que sua carga seja negativa.
20. Na fotografia da fig. 22-18, dizer se o campo magnético que foi aplicado ao feixe de elétrons está entrando na folha de papel ou saindo dela.
21. Considerando o movimento dos elétrons mostrados na fig. 22-18, dizer se o raio da trajetória descrita pelo feixe aumenta, diminui ou não se altera em cada um dos seguintes casos:
 - a) O canhão eletrônico passa a emitir os elétrons com uma velocidade duas vezes maior.
 - b) O valor do campo magnético aplicado ao feixe é duplicado.
 - c) As modificações descritas em (a) e (b) são feitas simultaneamente.

22.5. Força magnética em um condutor

FIO CONDUTOR EM UM CAMPO MAGNÉTICO

Consideremos um fio retilíneo, de comprimento L , percorrido por uma corrente i , colocado em um campo magnético em uma direção perpendicular ao vetor \vec{B} , como mostra a fig. 22-19. Sabemos que a corrente elétrica no fio pode ser considerada, para todos os efeitos, como sendo constituída por cargas positivas em movimento. Então, o campo magnético \vec{B} atuará sobre estas cargas móveis, exercendo em cada uma a pequena força \vec{f} . Usando a regra do tapa, você poderá encontrar facilmente o sentido de \vec{f} . Aplicando esta regra à situação mostrada na fig. 22-19, você verificará que a força que atua em cada carga móvel da corrente tem o sentido ali indicado.

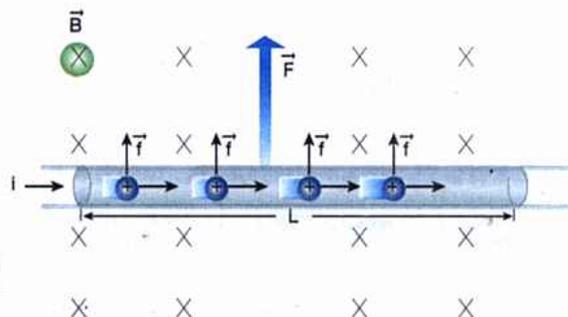


Fig. 22-19: Fio conduzindo corrente elétrica colocado em um campo magnético.

Como consequência desta ação do campo magnético sobre as cargas que constituem a corrente, atuará sobre o condutor uma força \vec{F} que nada mais é do que a resultante das forças \vec{f} . Observe a força \vec{F} também indicada na fig. 22-19.

A fig. 22-20 apresenta uma experiência muito simples que ilustra a existência desta força magnética sobre o condutor: um fio metálico CD , suspenso entre os pólos de um ímã, ao ser percorrido por uma corrente, é deslocado lateralmente pela força magnética \vec{F} . Observe que o sentido desta força pode ser determinado pela regra do tapa, como está indicado na fig. 22-20 (o dedo polegar deve apontar no sentido da corrente convencional, isto é, no sentido do movimento das cargas positivas).

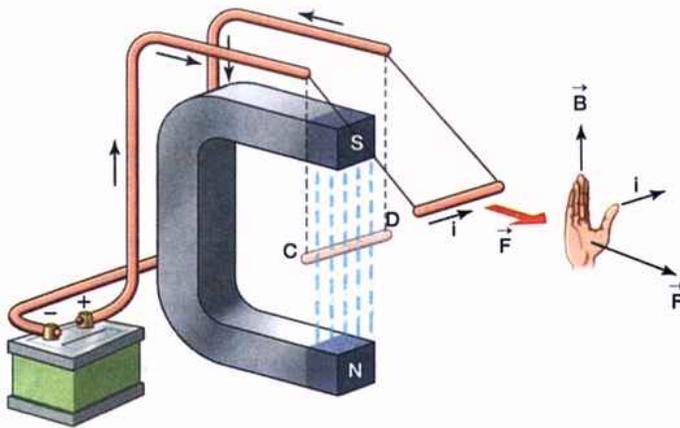


Fig. 22-20: Ilustração esquemática. A regra do tapa pode ser utilizada para determinar o sentido da força que atua sobre um fio que conduz uma corrente elétrica, colocado em um campo magnético.

CÁLCULO DA FORÇA QUE ATUA NO CONDUTOR

Na fig. 22-19, seja q a carga de cada partícula móvel da corrente e \vec{v} a sua velocidade. Como o fio foi colocado perpendicularmente ao campo \vec{B} , o valor da força \vec{f} que atua em cada partícula será

$$f = Bqv \quad (\text{pois } \theta = 90^\circ)$$

Sendo N o número de cargas móveis existentes no comprimento L do fio, é claro que o valor de \vec{F} será

$$F = Nf \quad \text{ou} \quad F = NBqv = B(Nq)v$$

Deve-se observar que Nq representa a carga móvel total existente no comprimento L . Então, sendo Δt o tempo que esta carga gasta para se deslocar de uma distância L , podemos concluir que a intensidade da corrente no fio é dada por

$$i = \frac{Nq}{\Delta t} \quad \text{donde} \quad Nq = i\Delta t$$

Mas, sendo \vec{v} a velocidade de cada partícula, é claro que

$$L = v\Delta t \quad \text{donde} \quad v = \frac{L}{\Delta t}$$

Levando as expressões de Nq e v na equação $F = B(Nq)v$, teremos

$$F = B(i\Delta t) \frac{L}{\Delta t} \quad \text{donde} \quad F = BiL$$

Esta expressão foi obtida para o caso em que o condutor se encontra perpendicular ao campo magnético. É fácil concluir que, se o fio estiver formando um ângulo θ com \vec{B} , teremos a seguinte expressão para a força no condutor:

$$F = BiL \text{ sen } \theta$$

Assim, em resumo, podemos dizer que:

se um fio retilíneo, de comprimento L , percorrido por uma corrente i , for colocado em um campo magnético uniforme \vec{B} , sobre este fio atuará uma força magnética \vec{F} dada por

$$F = BiL \text{ sen } \theta$$

onde θ é o ângulo formado pelo fio condutor com o vetor \vec{B} . A força \vec{F} é perpendicular ao fio e o seu sentido pode ser determinado pela regra do tapa.

UMA APLICAÇÃO: O GALVANÔMETRO

A força que atua em um condutor percorrido por uma corrente, colocado em um campo magnético, é usada para fazer funcionar uma grande variedade de aparelhos elétricos de medida, como amperímetros e voltímetros (galvanômetros de um modo geral).

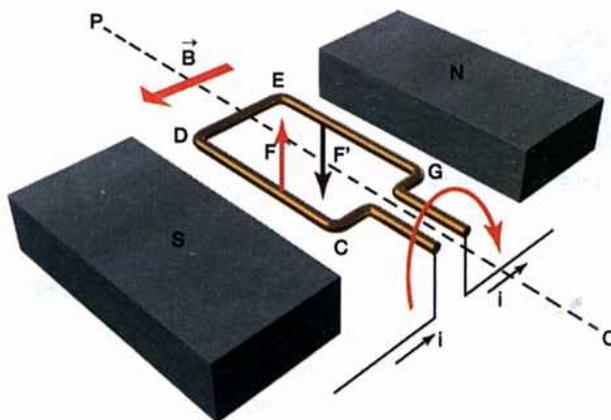


Fig. 22-21: Ilustração esquemática. Uma espira percorrida por uma corrente elétrica, colocada em um campo magnético, tende a girar.

Para melhor entender o funcionamento destes aparelhos, vamos analisar a fig. 22-21. Vemos, nesta figura, um fio dobrado formando um retângulo aberto $CDEG$, que é denominado *espira retangular*. Esta espira está colocada entre os pólos de um ímã, isto é, está situada dentro de um campo magnético \vec{B} . Fazendo-se passar uma corrente i na espira, com o sentido indicado na fig. 22-21, é fácil perceber que o lado CD ficará sob a ação de uma força magnética, \vec{F} , dirigida para cima. Sobre o lado EG da espira atuará uma força \vec{F}' , de mesmo módulo mas de sentido contrário a \vec{F} . Estas duas forças, \vec{F} e \vec{F}' , tendem, então, a fazer a espira girar em torno do eixo OP , no sentido indicado pela seta curva.

Este efeito de rotação observado na espira é usado na construção dos galvanômetros. De um modo geral, para aumentar o efeito de rotação (aumentar a sensibilidade do aparelho), são usadas várias espiras, que costumam ser enroladas em um cilindro, da maneira mostrada na fig. 22-22.

Adaptados ao cilindro existem uma mola em espiral e um ponteiro que se desloca ao longo de uma escala. Quando uma corrente passa através do aparelho, as espiras giram (juntamente com o cilindro) e provocam uma deformação na mola. A mola deformada se opõe ao efeito de rotação das forças que atuam na espira, fazendo com que o ponteiro se detenha em uma determinada posição da escala. Quanto maior for a corrente que passar no aparelho, maior será o efeito de rotação das forças magnéticas e, portanto, maior será o deslocamento do ponteiro sobre a escala. Desta maneira, graduando-se a escala, o aparelho poderá ser usado para nos fornecer o valor da corrente que passa através dele (fig. 22-22).

A fig. 22-23 apresenta uma fotografia de um miliamperímetro, muito usado em laboratórios de ensino e cujo funcionamento é baseado no estudo que acabamos de fazer.

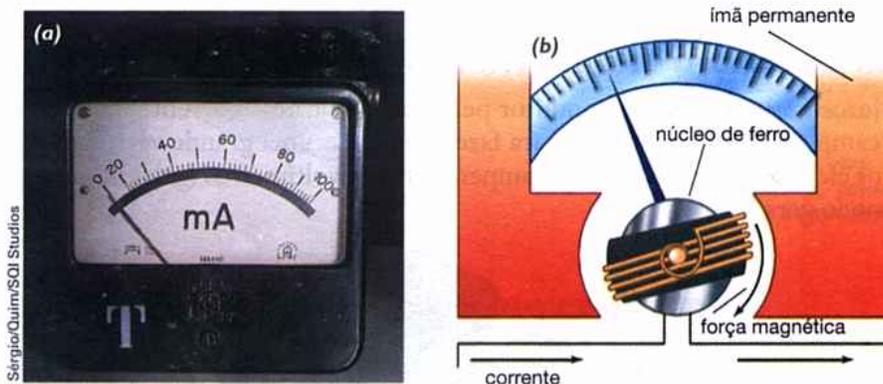


Fig. 22-23: Fotografia de um miliamperímetro (a) e diagrama mostrando detalhes de seu funcionamento (b).

OUTRA APLICAÇÃO: O MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Grande parte dos motores elétricos que são usados atualmente também funciona tendo por base o efeito de rotação das forças que atuam em espiras colocadas em um campo magnético. Vamos nos preocupar aqui em descrever apenas os motores de corrente contínua, como os motores de arranque dos automóveis ou os motores a pilha usados em carrinhos de brinquedo.

A fig. 22-24 é um modelo muito simples de um motor de corrente contínua. Observe que este dispositivo é muito semelhante ao da fig. 22-21. Entretanto, os fios E e E' que conduzem a corrente estão apenas encostados nas extremidades C e G da espira. Os fios E e E' são denominados *escovas* do motor. Quando a espira começa a girar, suas extremidades C e G perdem contato com as escovas, até que ela complete meia-volta. Neste momento, a extremidade C entra em contato com a escova E' e a extremidade G com a escova E . Assim, é fácil perceber que, a cada contato da espira com as escovas, as forças magnéticas atuam na espira de modo a fazer com que ela continue a girar sempre no mesmo sentido.

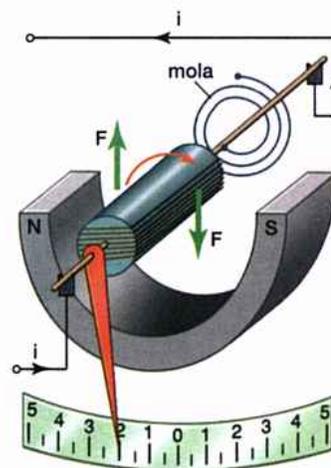


Fig. 22-22: O funcionamento dos galvanômetros baseia-se no efeito de rotação que os campos magnéticos provocam nas espiras conduzindo corrente elétrica.

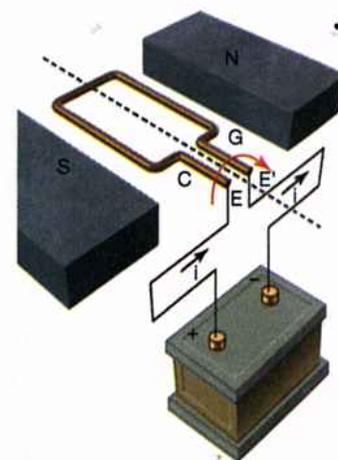


Fig. 22-24: Modelo simples de motor de corrente contínua.

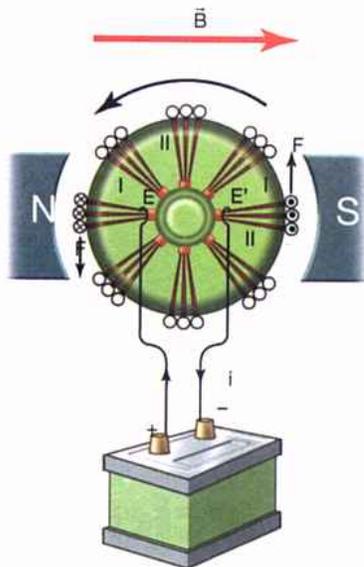
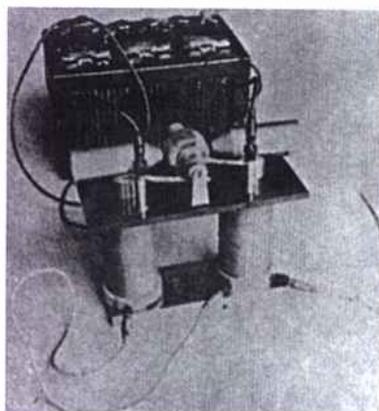


Fig. 22-25: Esquema de motor de corrente contínua, construído com vários conjuntos de espiras.

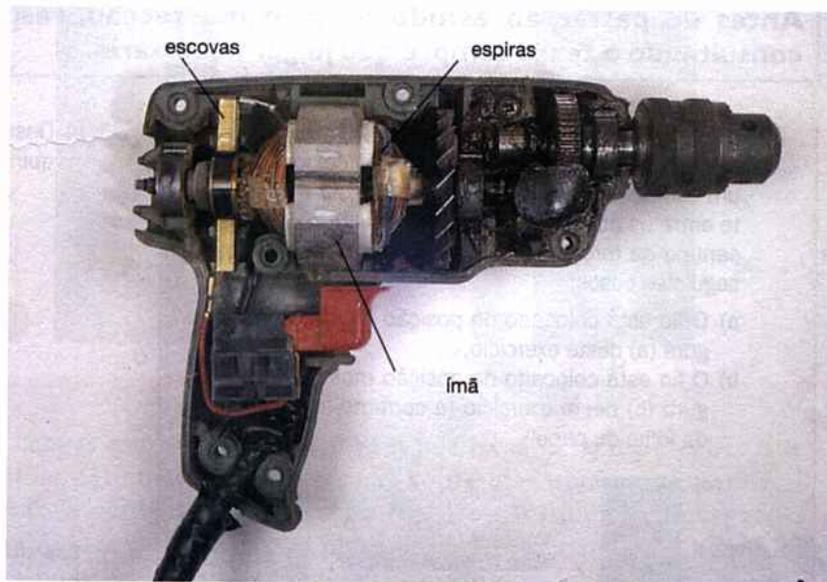
Devemos observar, na fig. 22-24, que só há corrente passando na espira quando suas extremidades entram em contato com as escovas e, então, as forças magnéticas só impulsionam a espira nestes momentos. Para aumentar a potência dos motores, eles geralmente são construídos com vários conjuntos de espiras, como mostra a fig. 22-25 (vista de frente do motor). Na posição mostrada nesta figura, as escovas E e E' estão em contato com as espiras I, sobre as quais estão atuando, então, as forças magnéticas que impulsionam o motor no sentido indicado. Logo em seguida, estas espiras perdem o contato com as escovas, sendo substituídas pelas espiras II, que recebem um impulso no mesmo sentido e assim sucessivamente. Desta maneira, em um motor como esse haverá maior continuidade em seu movimento de rotação.

A fig. 22-26 é uma fotografia de um pequeno motor de corrente contínua, do tipo que acabamos de descrever, usado para demonstrações experimentais em aulas práticas de Física.



Profa. Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

Fig. 22-26: Pequeno motor de corrente contínua usado para demonstrações nos laboratórios de ensino.



Sérgio/Quim/SOI Studios

Visão interna de uma furadeira elétrica, mostrando as partes mais importantes de seu motor.

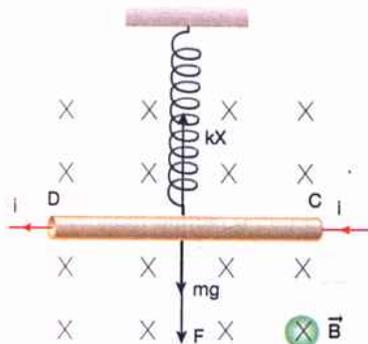


Fig. 22-27: Para o exemplo da seção 22.5.

Exemplo

Um fio CD , de 30 cm de comprimento, está suspenso horizontalmente, por meio de uma mola, dentro de um campo magnético uniforme $B = 0,10$ T, como mostra a fig. 22-27.

- a) Fazendo-se passar no fio uma corrente $i = 10$ A, dirigida de C para D , qual será o sentido e o valor da força magnética \vec{F} que atuará sobre o fio?

Usando a regra do tapa verificamos que a força magnética \vec{F} está dirigida verticalmente para baixo, como está indicado na fig. 22-27. Observando que a direção do fio é perpendicular a \vec{B} ($\theta = 90^\circ$), teremos o seguinte valor para a força \vec{F} :

$$F = BIL = 0,10 \times 10 \times 0,30 \quad \text{ou} \quad F = 0,30 \text{ N}$$

- b) Sabendo-se que a massa do fio é $m = 20 \text{ g}$ e que a constante elástica da mola é $k = 20 \text{ N/m}$, determinar a deformação apresentada pela mola (considerar $g = 10 \text{ m/s}^2$).

Como o peso do fio e a força magnética sobre ele estão ambos dirigidos para baixo, a mola sofrerá um alongamento X . Na posição de equilíbrio, a força exercida pela mola (kX) estará equilibrando o peso do fio (mg) e a força magnética (F). Logo, podemos escrever:

$$kX = mg + F$$

Mas: $mg = (20 \times 10^{-3}) \times 10 = 20 \times 10^{-2}$ ou $mg = 0,20 \text{ N}$

Então, lembrando-se que $F = 0,30 \text{ N}$, teremos:

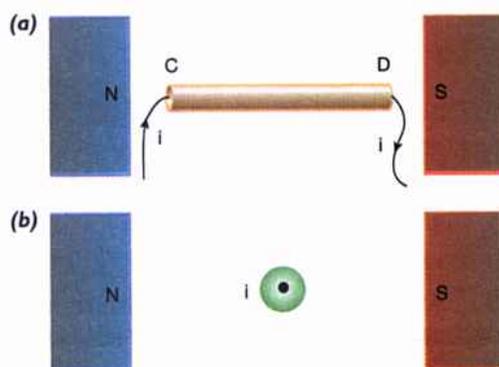
$$20X = 0,20 + 0,30 \quad \text{donde} \quad X = 2,5 \times 10^{-2} \text{ m} = 2,5 \text{ cm}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

22. Um fio CD , cujo comprimento é $L = 25 \text{ cm}$, percorrido por uma corrente $i = 3,0 \text{ A}$, está colocado em um campo magnético uniforme $B = 0,20 \text{ T}$ existente entre os pólos de um ímã. Determine o valor e o sentido da força magnética \vec{F} que atua no fio nos seguintes casos:

- O fio está colocado na posição mostrada na figura (a) deste exercício.
- O fio está colocado na posição mostrada na figura (b) deste exercício (a corrente está saindo da folha de papel).

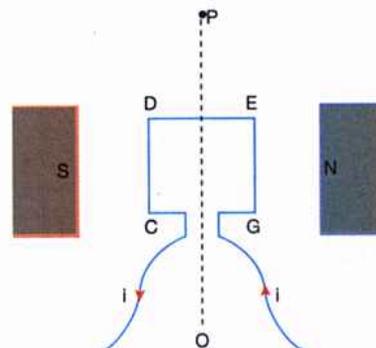


Exercício 22.

23. A figura deste exercício mostra uma espira retangular $CDEG$, situada no plano da folha de papel, colocada entre os pólos de um ímã. Observando o sentido da corrente que está passando na espira, responda:

- Qual é o sentido da força que atua em cada um dos lados GE , ED e DC da espira?

- Descreva o movimento que a espira tende a adquirir.



Exercício 23.

24. Na fig. 22-24, dizer o que ocorrerá com a rotação do motor se fizermos as seguintes modificações:

- Trocamos as posições dos pólos N e S .
- Invertemos o sentido da corrente de modo que ela passe a penetrar pela escova E' .
- Efetuamos simultaneamente as duas modificações descritas em (a) e (b).

25. Considere o exemplo resolvido no final desta secção, mas suponha que o campo magnético \vec{B} , na fig. 22-27, esteja saindo da folha de papel. Nestas condições, responda:

- Qual o módulo da força resultante que estaria atuando na mola?
- A mola seria esticada ou comprimida?
- Qual seria o valor da deformação, X , da mola?

Sinal das cargas que se movem em um condutor metálico

Desde o início de nosso curso de Eletricidade, informamos a você que, em um metal, existem elétrons livres que se movimentam, constituindo uma corrente elétrica, quando aplicamos a ele uma voltagem. Analisaremos, a seguir, a experiência realizada pelo físico americano E. Hall, no final do século XIX, que lhe permitiu verificar que a corrente elétrica estabelecida em um metal é constituída por *cargas negativas*.

Consideremos a fig. I, que apresenta uma placa metálica, nas extremidades P e Q da qual foi aplicada uma diferença de potencial, sendo P o ponto de potencial mais alto. Além disso, um campo magnético \vec{B} é aplicado perpendicularmente ao plano da placa, como mostra a figura. Na época de Hall, havia dúvida se a corrente elétrica na placa seria constituída por cargas positivas se deslocando de P para Q (veja a fig. I-a), ou por cargas negativas se deslocando de Q para P (veja a fig. I-b).

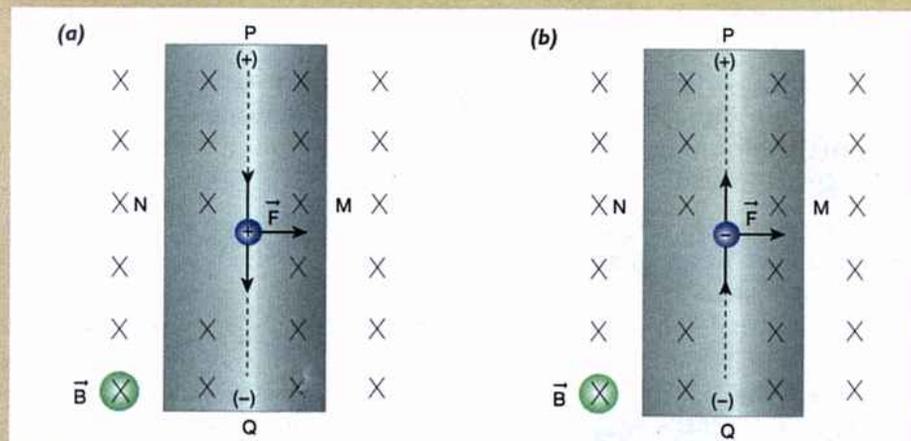


Fig. I.

Se as cargas que se deslocam forem positivas, é fácil perceber que o campo magnético aplicado exerceria sobre elas uma força magnética \vec{F} , como o sentido mostrado na fig. I-a. Assim, essas cargas se deslocariam para a lateral M da placa e, então, teríamos um acúmulo de cargas positivas em M , com um conseqüente excesso de cargas negativas em N . Assim, seria estabelecida entre M e N uma voltagem V_{MN} , sendo $V_M > V_N$. Se as cargas que se deslocam forem negativas, o campo magnético aplicado exerceria sobre elas uma força magnética \vec{F} , também dirigida para a lateral M , como mostra a fig. I-b (verifique isto usando a regra do tapa). Portanto, haverá, ainda neste caso, uma diferença de potencial V_{MN} ; agora, porém, com $V_M < V_N$ (cargas negativas na lateral M).

Medindo a voltagem V_{MN} na situação analisada, Hall verificou que se tem sempre, em qualquer metal, $V_M < V_N$. Concluiu, então, que a hipótese mostrada na fig. I-b é aquela que corresponde à situação real, isto é, a corrente no metal é constituída pelo movimento de cargas negativas. Naquela ocasião, como veremos no capítulo seguinte, o elétron não havia ainda sido descoberto e os físicos da época, entre eles o próprio Hall, interpretavam este resultado como se a corrente fosse constituída por um fluido elétrico negativo em movimento.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

22.6.0 ciclotron

PARTÍCULAS COM ALTA ENERGIA SÃO NECESSÁRIAS NA FÍSICA MODERNA

Quando um núcleo de elemento radioativo se desintegra, além de outras radiações, ele emite partículas α , as quais, como você já deve saber, são constituídas por 2 prótons e 2 nêutrons (núcleo do átomo de hélio). Estas partículas podem ser usadas para provocar a desintegração de elementos não-radioativos. Para isto, elas são lançadas contra estes núcleos e, ao atingi-los, causam uma reação nuclear.

Até cerca de 1930, esta era a única maneira de que os físicos dispunham para produzir reações nucleares artificialmente. Entretanto, como a energia dessas partículas α é relativamente pequena, elas não alcançavam os núcleos mais pesados (de maior número atômico), em virtude da forte repulsão que sofriam ao se aproximarem destes núcleos. Assim, até aquela época, era praticamente impossível obter reações nucleares com núcleos pesados.

Para contornar este problema, uma vez que o interesse em pesquisas com reações nucleares era muito grande, os físicos procuraram desenvolver dispositivos que fossem capazes de fornecer partículas atômicas de alta energia. O gerador de Van de Graaff, que descrevemos e analisamos no Tópico Especial do capítulo 19, foi um dos primeiros aparelhos inventados com esta finalidade. Outro dispositivo, desenvolvido aproximadamente na mesma época e com o mesmo objetivo, foi o *ciclotron*. Este aparelho foi construído pelo físico americano E. Lawrence, que, em 1931, fez funcionar o primeiro deles (fig. 22-28). Por esta invenção, e pelo estudo de um grande número de reações nucleares processadas graças a este aparelho, E. Lawrence recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1939.

Ernest Orlando Lawrence (1901-1958).

Físico americano, ganhador do Prêmio Nobel de Física em 1939 pela invenção do ciclotron, o primeiro acelerador de partículas subatômicas para obter partículas com altas energias. Inicialmente professor de Física na Universidade de Yale, transferiu-se mais tarde para a Universidade da Califórnia, em Berkeley. Aí, utilizando um dos ciclotrons que havia construído, Lawrence obteve o primeiro elemento artificial (que não é encontrado na natureza), que foi denominado *technetium*. A invenção do ciclotron possibilitou um grande avanço no campo da Física das Partículas e a descoberta de isótopos radioativos que provocaram progressos também na Química, Biologia e Medicina. Além de seus trabalhos no campo da Física Nuclear, Lawrence inventou e patenteou um tubo de televisão em cores. Muitas homenagens, além do Prêmio Nobel, foram tributadas ao grande físico, entre elas o nome *lawrencium* dado a um elemento artificial.



PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CÍCLOTRON

O princípio físico no qual se baseia a construção do ciclotron foi analisado na seção 22.4 deste capítulo. Vimos ali que uma partícula eletrizada com uma carga q , lançada em um campo magnético uniforme \vec{B} , com uma velocidade \vec{v} perpendicular a este campo, descreve uma trajetória circular sob a ação da força magnética que atua na partícula. Mostramos que o raio desta trajetória é dado por

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad \text{onde } m \text{ é a massa da partícula.}$$

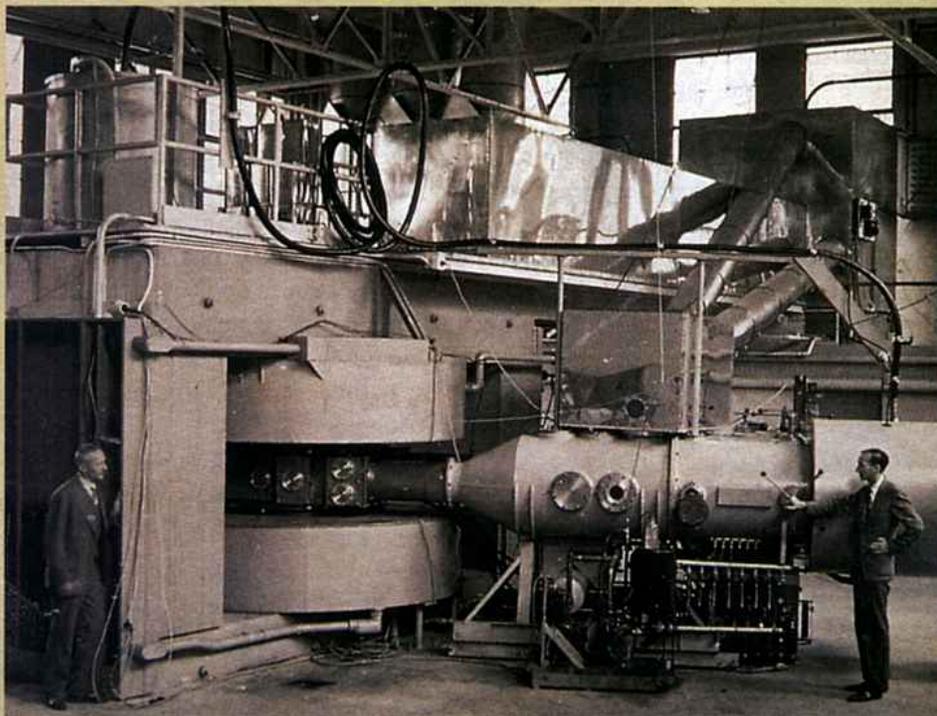


Fig. 22-28: Ciclotron construído pelo físico americano E. Lawrence.

Podemos calcular o período, T , deste movimento circular lembrando que $T = 2\pi R/v$. Então, substituindo R na expressão anterior, teremos:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{Bq} \quad \text{donde} \quad T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

Portanto, esta expressão nos mostra que o período de rotação da partícula não depende nem de R , nem de v . Em outras palavras, qualquer que seja o raio da trajetória, o tempo gasto para efetuar uma volta completa será o mesmo. Isto ocorre porque, quanto maior for a velocidade com que a partícula é lançada no campo magnético, maior será o raio da trajetória que ela descreverá.

Como mostraremos a seguir, o fato de o período da partícula no campo magnético não depender do raio da trajetória desempenha um papel muito importante no funcionamento do ciclotron.

COMO FUNCIONA UM CÍCLOTRON

A fig. 22-29 apresenta esquematicamente os principais componentes de um cíclotron. Vemos que ele é constituído por duas câmaras metálicas ocas, com a forma da letra D (D_1 e D_2 na fig. 22-29), colocadas no campo magnético produzido por poderosos eletroímãs (a figura apresenta apenas o pólo norte deste eletroímã). Entre os terminais P e Q é aplicada uma voltagem alternada de alta frequência, de modo a criar no intervalo entre D_1 e D_2 um campo elétrico também alternado, isto é, cujo sentido ora aponta de D_1 para D_2 , ora aponta em sentido contrário.

Um dispositivo que emite íons de baixa energia (prótons ou dêuterons) é colocado no ponto F, situado entre D_1 e D_2 na posição indicada na fig. 22-29. Suponha que um íon (um próton, por exemplo) seja produzido em F no instante em que o campo elétrico está voltado de D_2 para D_1 . Este íon é acelerado por este campo elétrico e penetra no interior de D_1 com uma certa velocidade. Nesta região, ele descreve uma trajetória circular sob a ação do campo magnético e retorna ao espaço entre D_1 e D_2 . Se o período com o qual o campo elétrico se alterna for igual ao período do movimento circular da partícula, ao sair de D_1 , a partícula encontrará o campo elétrico voltado exatamente de D_1 para D_2 . Assim, o próton sofrerá nova aceleração, adquirindo maior energia e penetrando no interior de D_2 com maior velocidade. Em D_2 ele descreverá, portanto, uma trajetória de maior raio, mas, apesar disto, ele permanecerá em D_2 o mesmo tempo que esteve em D_1 . Então, ao sair de D_2 , o próton encontra o campo elétrico voltado de D_2 para D_1 e torna a ser acelerado, adquirindo uma energia ainda maior.

Este processo se repete um grande número de vezes, fazendo com que o íon tenha uma energia muito elevada ao sair pela abertura lateral L (fig. 22-29), onde é colocado o alvo, isto é, a substância que contém os núcleos a serem bombardeados.

Nos cíclotrons mais modernos, como aquele mostrado na fig. 22-30, os prótons executam cerca de 100 voltas completas no interior do aparelho e adquirem uma energia igual àquela que adquiririam se fossem acelerados por uma diferença de potencial de, aproximadamente, 12 milhões de volts (energia de 12 milhões de elétron-volts = 12 MeV).

O QUE É UM SINCROCÍCLOTRON

Um fato relacionado com a Teoria da Relatividade impede que a energia de um íon em um cíclotron alcance valores muito superiores àquele citado. No Tópico Especial do capítulo 5 vimos que a massa de um corpo aumenta à medida que sua velocidade cresce. Entretanto, estas variações da massa somente se tornam apreciáveis a partir do instante em que a velocidade do corpo se torna superior a 10% da velocidade da luz. Como as velocidades que uma partícula alcança em um cíclotron são muito grandes, a variação em sua massa pode ser bastante sensível. Então, à medida que a partícula no interior do aparelho vai adquirindo maior energia, sua massa vai aumentando e a equação $T = 2\pi m/Bq$ nos mostra que o período de seu movimento também aumenta. Por este motivo, deixa de haver sincronismo entre o movimento do íon e a alternância do campo elétrico, isto é, ao passar entre D_1

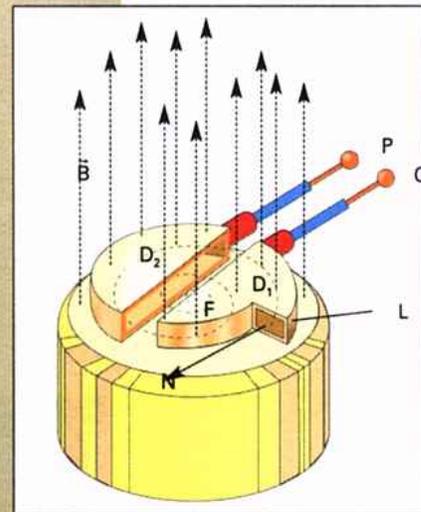


Fig. 22-29: Esquema de um cíclotron, mostrando as câmaras metálicas em forma de D.

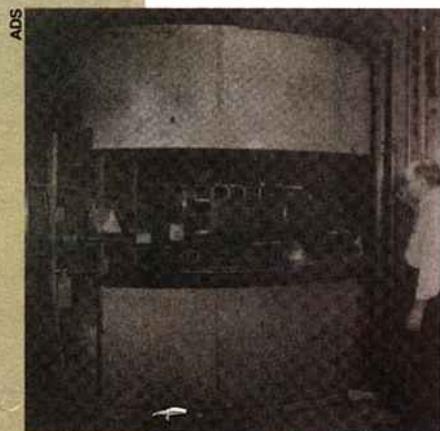


Fig. 22-30: Cíclotron do laboratório de Argonne, nos Estados Unidos.

e D_2 a partícula poderá encontrar o campo elétrico em sentido contrário ao seu movimento. Nestas condições, o campo elétrico não mais transfere energia à partícula, sendo atingido, assim, o limite de energia que o íon pode adquirir.

Para superar esta dificuldade os físicos aperfeiçoaram o aparelho, construindo um ciclotron sincronizado, o qual foi denominado *sincrociclotron*. Neste acelerador de partículas, o período de alternância do campo elétrico é variável automaticamente, permanecendo sempre igual ao período do movimento do íon que está sendo acelerado.

Em 1948, um sincrociclotron havia sido instalado em Berkeley, nos Estados Unidos, permitindo acelerar partículas α com uma energia de 400 MeV (como se as partículas fossem aceleradas por 200 milhões de volts). Foi com este aparelho que o cientista brasileiro César Lattes, trabalhando com um colega americano, conseguiu produzir artificialmente o méson π , bombardeando diversas substâncias com aquelas partículas α . Este fato teve uma grande repercussão porque o méson π , que é uma das partículas elementares constituintes da matéria, era muito pouco conhecido e tinha sido descoberto recentemente. Uma fotografia deste sincrociclotron é mostrada na fig. 22-31. O aparelho tem cerca de 4,5 m de diâmetro e, com algumas modificações, tornou possível a aceleração de prótons até uma energia de 730 MeV.

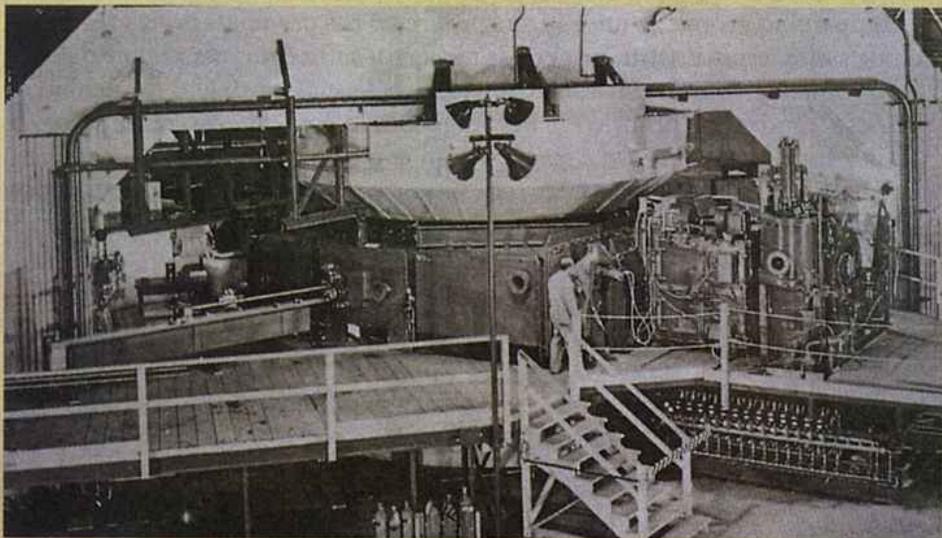


Fig. 22-31: Sincrociclotron do laboratório de Berkeley, com o qual César Lattes produziu o méson π .



SPL/Stock Photos

César Lattes (1924-2005)

Nascido em Curitiba, o físico brasileiro César Lattes estudou na Universidade de São Paulo. Iniciou-se em trabalhos de pesquisa no campo da Física de Partículas com o físico italiano Occhialini, que, nesta época, lecionava naquela universidade. Transferindo-se para Bristol, nos Estados Unidos, juntamente com Occhialini e o físico inglês Powell, e examinando chapas fotográficas que ele havia exposto à ação dos raios cósmicos nos Andes bolivianos, Lattes verificou a existência do méson π . Em 1948, obteve a produção artificial destas partículas trabalhando no sincrociclotron do Lawrence Laboratory da Universidade de Berkeley. Foi um dos fundadores do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro; já lecionou em diversas universidades brasileiras e foi um dos grandes incentivadores do desenvolvimento científico em nosso país.

Modernos aceleradores de partículas

As primeiras tentativas para romper o núcleo de um átomo levaram à construção dos aceleradores de partículas (veja a fig. I). O primeiro desses aparelhos foi construído na Inglaterra, em 1930, e era capaz de acelerar elétrons com tensão de algumas centenas de milhares de volts (veja a fig. II). Pouco tempo depois, E. Lawrence colocava em funcionamento o primeiro ciclotron, que conseguia dar às partículas aceleradas energias de até 1 MeV. O aperfeiçoamento desses aparelhos fez-se rapidamente e, conforme mencionamos nesta secção, na década de 40 já era possível encontrar sincrociclotrons de até 700 MeV.

As pesquisas no campo da Física Nuclear de Altas Energias exigiam, entretanto, aparelhos capazes de gerar partículas com energias muito mais elevadas do que as citadas. Em Genebra, no CERN* (Conseil Européen des Recherches Nucléaires), por exemplo, foi construído o aparelho denominado supersíncrotron de prótons (SPS), com forma circular, de comprimento aproximadamente igual a 6 km. A fig. III mostra parte deste aparelho, que é capaz de fornecer prótons com energia de 50 BeV, isto é, como se eles tivessem sido acelerados por uma diferença de potencial de 50 bilhões de volts! Este aparelho propiciou um enorme progresso nas pesquisas desta área, mas, ainda assim, estas altíssimas energias não eram suficientes para obter o desejado conhecimento da estrutura da matéria e de suas partículas elementares. Por este motivo, no próprio CERN foi colocado em operação recentemente o LEP (*large electron positron collider*), com comprimento de 27 km (também circular). Em fase de planejamento encontra-se um acelerador gigantesco, com 93 km de extensão, denominado *superconducting supercollider* (SSC)!



Fig. I: Rutherford, tendo em suas mãos o aparelho por ele planejado, com o qual conseguiu obter a desintegração de núcleos de nitrogênio, bombardeando-os com partículas α (não aceleradas, emitidas espontaneamente por elementos radioativos).

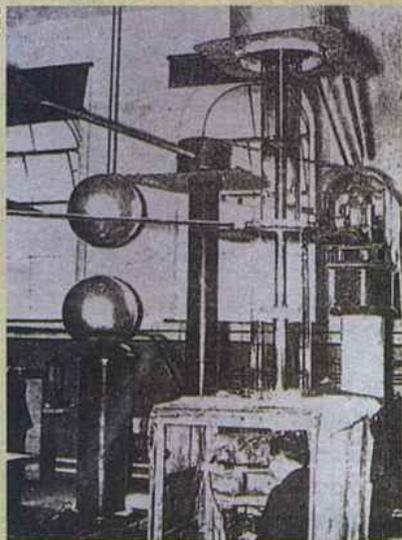


Fig. II: O primeiro acelerador de partículas de alta tensão, construído em 1930, na Inglaterra.

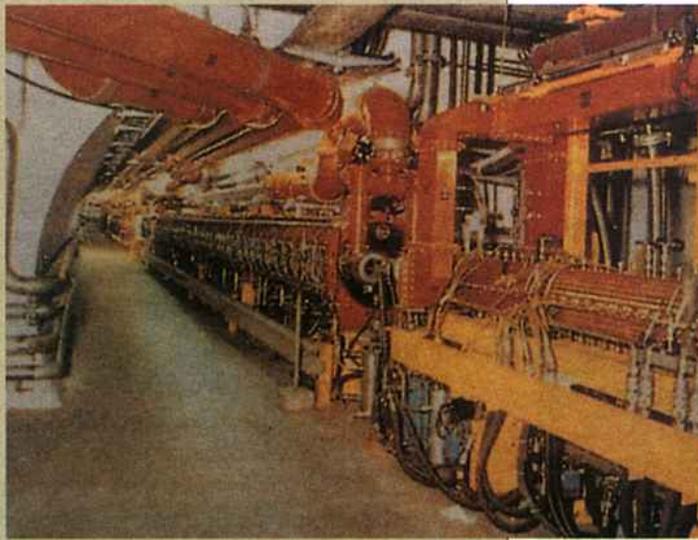


Fig. III: Supersíncrotron de prótons (SPS), construído no CERN, de forma circular, com 6 km de comprimento.

* O CERN possui laboratórios de pesquisas nucleares, construídos nas proximidades de Genebra, na Suíça, com recursos de vários países da Europa. Esta associação de países para realização de pesquisas foi concretizada, principalmente, em virtude dos altíssimos custos exigidos na montagem de laboratórios de alta energia.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

26. Considere os átomos de carbono (C_6^{12}) e de ouro (Au_{79}^{197}). Para provocar a desintegração dos núcleos desses átomos, qual deles deverá ser bombardeado com partículas de maior energia? Explique.
27. a) Suponha que um próton gaste 2,5 μ s em sua primeira passagem por um D de um ciclotron. Em sua centésima passagem pelo mesmo D , o próton gastará um tempo maior, menor ou igual a 2,5 μ s?
b) Com que frequência o campo elétrico do ciclotron deve oscilar para acelerar este próton?
28. No interior de cada D de um ciclotron onde os íons se movimentam, é feito um alto vácuo (da ordem de 10^{-6} mmHg). Por que isto é indispensável para o bom funcionamento do aparelho?
29. Em um ciclotron, a diferença de potencial entre D_1 e D_2 (os "dês" do aparelho) vale 2×10^5 V. Deseja-se que a partícula que está sendo acelerada adquira uma energia final de 12 MeV. Determine quantas voltas a partícula deve efetuar no ciclotron, supondo que ela seja
a) um próton.
b) uma partícula α .
30. Em um sincrociclotron, quando a velocidade da partícula torna-se muito elevada:
a) O que ocorre com o período do movimento da partícula no interior do aparelho? Explique.
b) Então, que alteração deve ser feita na frequência de oscilação do campo elétrico para que ele continue transferindo energia à partícula? Por quê?
c) Por que com as velocidades alcançadas no ciclotron este ajuste não precisava ser feito?
31. No interior de um ciclotron, um dêuteron (núcleo do deutério) está se movendo em uma trajetória circular de 2,0 m de raio. Em determinado instante, o próton e o nêutron que constituem o dêuteron se separam sem que haja modificação no módulo da velocidade de cada partícula. Descreva o tipo de trajetória descrita, logo após a desintegração,
a) pelo nêutron.
b) pelo próton.
32. Um ciclotron foi ajustado para acelerar dêuterons. Suponha que seja necessário ajustá-lo para acelerar prótons (cuja massa é metade da massa do dêuteron).
a) Que alteração deveria ser feita para que não seja necessário modificar a frequência do campo elétrico oscilante?
b) Que alteração deveria ser feita se desejarmos manter invariável o valor do campo magnético?

Revisão

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

1. a) O que se entende por um ímã natural? E por um ímã artificial?
b) O que são pólos de um ímã?
2. a) Por que uma agulha magnética pode ser usada como bússola?
b) O que é o pólo norte de um ímã? E o pólo sul?
3. a) Entre que pólos de dois ímãs existe uma força de atração? E uma força de repulsão?
b) Qual a explicação dada por Gilbert para o fato de uma agulha magnética se orientar na direção norte-sul?
c) É possível obter um ímã que possua apenas um pólo (norte ou sul)? Explique.
4. a) Descreva a experiência de Oersted, ilustrando sua explicação com um diagrama.
b) Qual a importante conclusão que foi possível tirar desta experiência?
c) Diga com suas palavras o que se entende por Eletromagnetismo.

5. Em que condições existirá uma força magnética entre duas cargas elétricas?
6. a) Como se deve proceder para criar um campo magnético em uma região do espaço?
b) Um campo magnético atua em uma carga em repouso?
7. Explique como se determina, usando-se uma pequena agulha magnética, a direção e o sentido do vetor campo magnético, \vec{B} , em um ponto.
8. a) Escreva a expressão matemática que fornece o valor da força que atua em uma carga elétrica em movimento dentro de um campo magnético. Explique o significado de cada um dos símbolos que aparecem nesta expressão.
b) Explique como você pode determinar a direção e o sentido desta força.
c) Qual é a unidade de medida do módulo de \vec{B} no S.I.?
9. a) Explique o que são as linhas de indução de um campo magnético.
b) Faça um desenho mostrando como se pode obter experimentalmente um campo magnético uniforme.
- c) No desenho feito em (b), trace algumas linhas de indução deste campo magnético.
10. a) Em que condições uma carga elétrica descreverá uma trajetória circular dentro de um campo magnético?
b) Lembrando que a força magnética representa a força centrípeta, mostre como se obtém a expressão $R = mv/Bq$ que nos fornece o raio da trajetória circular.
11. a) Escreva a expressão matemática que nos permite calcular a força que um campo magnético exerce sobre um condutor percorrido por uma corrente, colocado neste campo. Explique o significado de cada um dos símbolos que aparecem nesta expressão.
b) Mostre como devemos proceder para determinar a direção e o sentido desta força que atua no condutor.
12. a) Observando a fig. 22-22, descreva com suas palavras como funciona o galvanômetro ali apresentado.
b) Observando as figuras 22-24 e 22-25, descreva com suas palavras como funciona o motor de corrente contínua.

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

Você já deve ter aprendido que, para determinar os pontos cardeais, basta se posicionar de tal modo que o seu lado direito esteja voltado para o local onde o Sol nasce, isto é, para o leste. Nestas condições, o seu lado esquerdo indicará o oeste, a sua frente estará voltada para o norte e o sul estará às suas costas.

- 1º) Seguindo esta orientação, determine o norte e o sul do local onde você se encontra.
- 2º) Tome uma pequena bússola e observe a orientação adquirida pela agulha magnética. Indique, então, qual é a extremidade onde se localiza o pólo norte da agulha.
- 3º) Se você possuir um ímã cujos pólos são desconhecidos, aproxime dele a agulha da bússola e determine qual dos pólos do ímã é o pólo norte e qual é o pólo sul.

Segunda experiência

Você poderá obter facilmente a configuração das linhas de indução de um campo magnético como, por exemplo, aquela mostrada na fotografia da fig. 22-12.

Para isto, coloque uma folha de cartolina (ou mesmo de papel) sobre um ímã em forma de barra. Em seguida, espalhe cuidadosamente (salpicando) limalha de ferro sobre a cartolina. Observe a configuração assim obtida e compare com a da fig. 22-12 (você pode conseguir limalha de ferro em uma serralharia ou oficina mecânica).

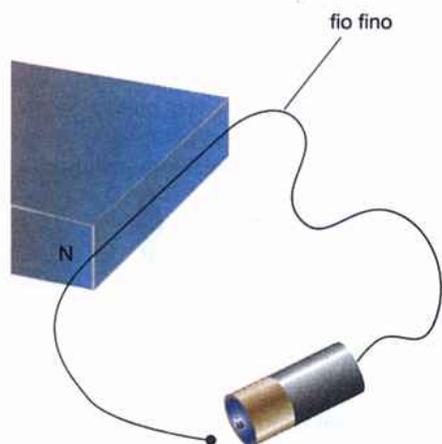
Se você (ou sua escola) possuir um ímã em forma de U (semelhante ao da fig. 22-13), procure mapear as linhas de indução do campo deste ímã usando o mesmo processo.

Terceira experiência

Vimos, na secção 22.5, que um fio percorrido por uma corrente, colocado em um campo magnético, fica sob a ação de uma força perpendicular a este fio. Você poderá comprovar este fato com a seguinte montagem: passe um fio bem fino horizontalmente entre os pólos de um ímã (ou em frente a um dos pólos de um ímã forte) e ligue uma de suas extremidades a um dos pólos de uma pilha (veja a figura desta experiência). Faça o contato da outra extremidade do fio com o outro pólo da pilha, de modo a estabelecer uma corrente elétrica no

condutor. Uma força magnética atuará sobre o fio e você poderá observar que ele se desloca (para cima ou para baixo) sob a ação desta força. Verifique se o deslocamento que você observou está de acordo com a regra do tapa estudada neste capítulo.

Procure prever, usando a regra do tapa, qual deve ser o sentido do deslocamento do fio, se o sentido da corrente nele for invertido. Faça a experiência (inverta a polaridade da pilha) e verifique se sua previsão estava correta. Invertendo, agora, o sentido do campo magnético (inverta as posições dos pólos do ímã), refaça sua previsão usando a regra do tapa e verifique-a experimentalmente.



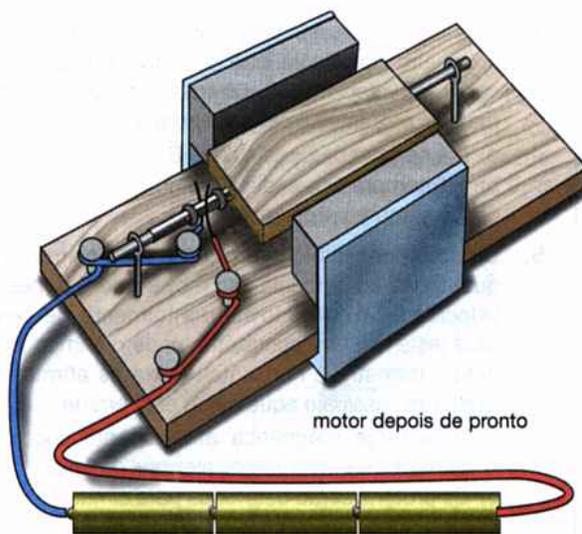
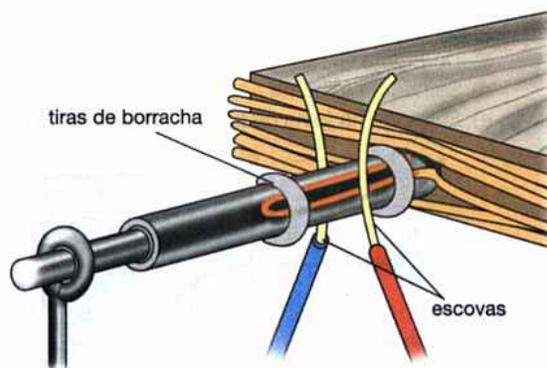
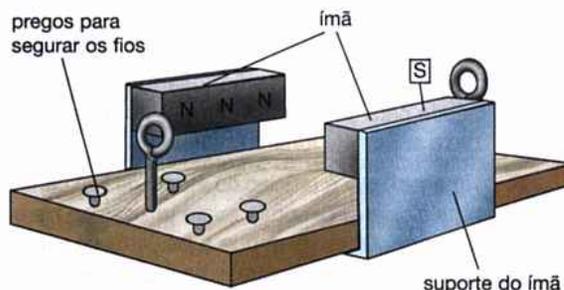
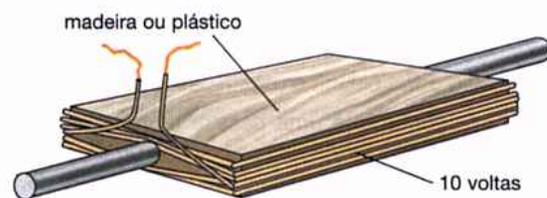
Terceira experiência.

Quarta experiência

Na experiência anterior você observou a força magnética exercida por um ímã sobre uma corrente elétrica. É possível também observar esta força atuando sobre o filamento de uma lâmpada elétrica comum. Para isto, basta aproximar do bulbo da lâmpada acesa um dos pólos de um ímã. Como a corrente que passa no filamento é alternada, isto é, como ela muda periodicamente de sentido, a força magnética sobre o filamento atuará ora em um sentido, ora em sentido contrário. Por este motivo, o filamento oscila, vibrando de maneira semelhante à corda de um violão. Se o bulbo da lâmpada for transparente, você poderá observar estas vibrações. Caso as vibrações não sejam visíveis com uma lâmpada comum, use um tipo de lâmpada de filamento reto, isto é, não-espiralado.

Quinta experiência

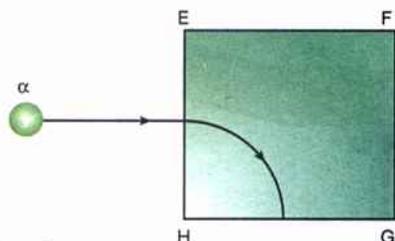
A figura desta experiência mostra um pequeno motor de corrente contínua, muito simples, e alguns detalhes que devem ser observados em sua montagem. Orientando-se por esta figura, procure construir um motor semelhante. Para criar o campo magnético, poderão ser empregados ímãs do tipo utilizado para fechar portas de armários. Fornecendo corrente a este motor por meio de uma ou mais pilhas, você verá que ele entrará em rotação muito rápida.



Quinta experiência.

problemas e testes problemas e testes problemas

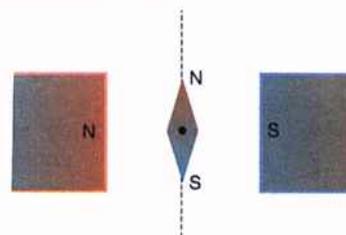
- Suponha que uma pessoa tenha em mãos duas barras de ferro idênticas, sendo uma delas um ímã e a outra um pedaço de ferro não imantado. Entretanto, a pessoa não sabe qual das duas barras é o ímã. Descreva pelo menos duas maneiras pelas quais ela poderá esclarecer a sua dúvida.
- Um astronauta, ao descer na Lua, verifica que não existe campo magnético na superfície de nosso satélite. Ele poderia, então, usar uma bússola magnética para se orientar em seus deslocamentos sobre a superfície lunar? Explique.
- Uma partícula α (núcleo do átomo de He) penetra em uma região $EFGH$ onde existe um campo magnético uniforme. Observa-se que a partícula é, então, desviada da maneira mostrada na figura deste problema. Nestas condições, poderemos concluir que a orientação do vetor \vec{B} na região $EFGH$ deve ser:
 - De E para F .
 - De E para H .
 - De E para G .
 - Saindo da folha de papel e perpendicular a ela.
 - Entrando na folha de papel e perpendicular a ela.



Problema 3.

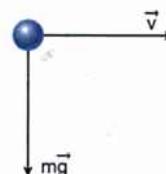
- Seja \vec{F} a força exercida por um campo magnético \vec{B} sobre uma partícula que se move neste campo com uma velocidade \vec{v} . Dizer se cada uma das afirmativas seguintes é certa ou errada:
 - \vec{F} é sempre perpendicular a \vec{B} .
 - \vec{F} é sempre perpendicular a \vec{v} .
 - \vec{v} é sempre perpendicular a \vec{B} .
- Um feixe, constituído de prótons e de elétrons, no qual todas as partículas se movem com a mesma velocidade, é lançado horizontalmente de oeste para leste em um laboratório, onde o campo magnético terrestre é horizontal. Entre as afirmativas seguintes, assinale aquela que está errada:
 - Uma força magnética atuará tanto sobre os prótons quanto sobre os elétrons do feixe.
 - Os prótons serão desviados para cima.
 - Os elétrons serão desviados para baixo.
 - A força magnética que atua em um próton tem módulo igual ao da força magnética que atua em um elétron.

- O desvio sofrido por um próton é igual ao desvio sofrido por um elétron.
- Uma agulha magnética é colocada entre os pólos de um ímã. A figura deste problema mostra a orientação que a agulha teria se não existisse o ímã. Desenhe, na figura, a orientação que a agulha irá adquirir nos seguintes casos:
 - O campo magnético da Terra é desprezível em relação ao campo magnético do ímã.
 - O campo magnético da Terra não é desprezível em relação ao campo do ímã.



Problema 6.

- Uma partícula eletrizada positivamente é lançada horizontalmente para a direita, com uma velocidade \vec{v} , como mostra a figura deste problema. Deseja-se aplicar à partícula um campo magnético \vec{B} , perpendicular a \vec{v} , de tal modo que a força magnética equilibre o peso da partícula.
 - Qual deve ser a direção e o sentido do vetor \vec{B} para que isto aconteça?
 - Supondo que a massa da partícula seja $m = 4,0$ mg, que sua carga seja $q = 2,0 \times 10^{-7}$ C e que sua velocidade seja $v = 100$ m/s, determine qual deve ser o módulo do vetor \vec{B} (considere $g = 10$ m/s²).

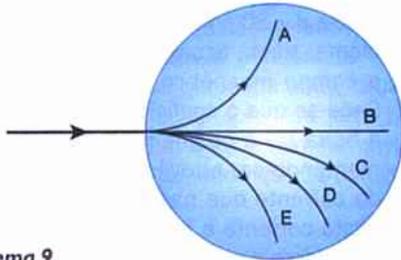


Problema 7.

- Um elétron foi lançado em um campo magnético \vec{B} , existente em uma certa região, com uma velocidade inicial \vec{v}_0 não-paralela a \vec{B} . Após se deslocar naquela região durante um certo tempo, o elétron abandonou o campo com uma velocidade \vec{v} . Supondo que a única força que atuou no elétron tenha sido a força magnética, assinale, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas:
 - A força magnética atuou sempre perpendicularmente à velocidade do elétron.
 - A força magnética provocou variações na direção da velocidade do elétron.

- c) O trabalho realizado pela força magnética sobre o elétron foi nulo.
- d) A ação da força magnética não provocou alteração na energia cinética do elétron.
- e) O módulo da velocidade \vec{v} com que o elétron abandonou o campo é igual ao módulo de \vec{v}_0 .

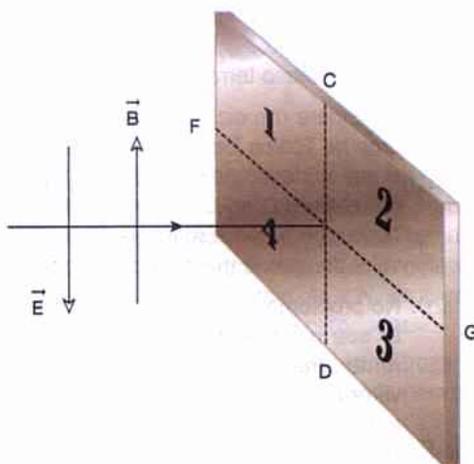
9. A figura deste problema representa esquematicamente uma câmara de bolhas, isto é, um dispositivo que torna visível as trajetórias de partículas atômicas. Um feixe de partículas, todas com a mesma velocidade, constituído por elétrons, pósitrons (elétrons positivos), prótons, nêutrons e dêutrons (partículas formadas por um próton e um nêutron), penetra nesta câmara, à qual está aplicado um campo magnético perpendicular ao plano do desenho. Observa-se que as partículas do feixe se desviam, dando origem a cinco feixes distintos, como é mostrado na figura. Diga quais as partículas que constituem cada um dos feixes ali indicados.



30 Problema 9.

10. Um feixe de elétrons incide horizontalmente no centro de um anteparo vertical, como mostra a figura deste problema.

- a) Se for aplicado ao feixe apenas um campo elétrico \vec{E} , como aquele mostrado na figura, para onde seriam desviados os elétrons?
- b) E se fosse aplicado ao feixe apenas um campo magnético \vec{B} como aquele mostrado na figura?
- c) Qual a região do anteparo que seria atingida pelos elétrons se os campos \vec{E} e \vec{B} fossem aplicados simultaneamente ao feixe?

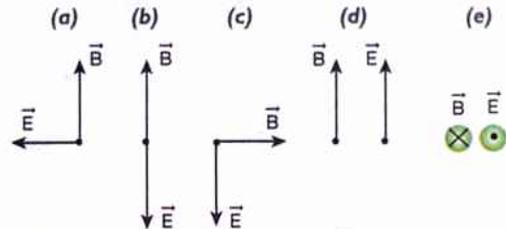


Problema 10.

11. Um feixe de partículas ionizadas está descrevendo uma trajetória circular em um campo magnético uniforme $B = 0,10 \text{ T}$.

- a) Qual deve ser, então, o ângulo entre o vetor \vec{B} e a velocidade das partículas?
- b) Sabendo-se que a carga de cada partícula é $q = 8,0 \times 10^{-19} \text{ C}$ e que elas se movem com uma velocidade $v = 2,0 \times 10^5 \text{ m/s}$, determine o valor da força magnética \vec{F} que atua em cada partícula.
- c) Qual é, então, o valor da força centrípeta \vec{F}_c que está atuando em cada partícula?
- d) Sendo $m = 6,0 \times 10^{-26} \text{ kg}$ a massa de cada partícula, calcule o raio da circunferência descrita pelo feixe.

12. Um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} atuam sobre um próton que se movimenta penetrando nesta folha de papel. Verifica-se que a resultante das forças elétricas e magnética que atuam sobre o próton é nula. Entre as alternativas apresentadas na figura deste problema, assinale aquela que mostra corretamente os campos \vec{E} e \vec{B} que atuam no próton.



Problema 12.

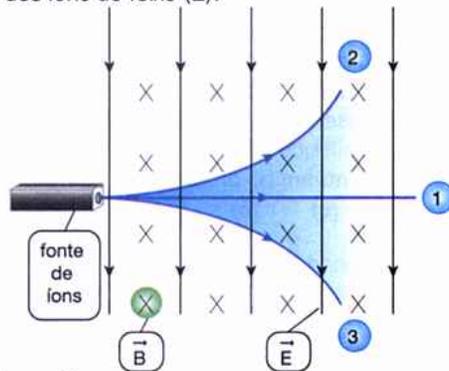
13. Em um laboratório de Física Moderna, um dispositivo emite íons positivos que se deslocam com uma velocidade \vec{v} muito elevada. Desejando medir o valor desta velocidade, um cientista aplicou na região onde os íons se deslocam os campos \vec{E} e \vec{B} mostrados na figura deste problema. Fazendo variar os valores de \vec{E} e \vec{B} , ele verificou que, quando $E = 1,0 \times 10^3 \text{ N/C}$ e $B = 2,0 \times 10^{-2} \text{ T}$, os íons atravessavam os dois campos em linha reta, como está indicado na figura. Com estes dados, o cientista conseguiu determinar o valor de \vec{v} . Qual foi o valor encontrado por ele?



Problema 13.

14. Suponha que o dispositivo mencionado no problema anterior emita íons que possuem sempre a mesma carga, apresentando, porém, diversas velocidades. Considere, então, que os íons emitidos deram origem a três feixes distintos, (1), (2) e (3), como está mostrado na figura deste problema. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquela que está *errada*:

- As forças elétricas que atuam nos íons dos feixes (1), (2) e (3) são iguais.
- Nos íons do feixe (2) atua uma força magnética maior do que a força elétrica.
- A velocidade dos íons do feixe (2) é maior do que a dos íons do feixe (1).
- A força magnética sobre os íons do feixe (2) é igual à força magnética sobre os íons do feixe (3).
- A velocidade dos íons do feixe (3) é menor do que a dos íons do feixe (1).



Problema 14.

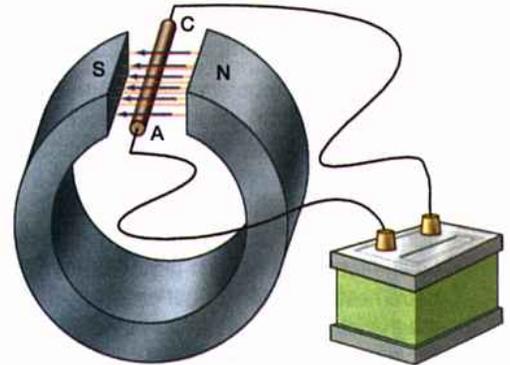
15. Para medir o valor de um campo magnético uniforme, colocou-se, neste campo, um condutor retilíneo, perpendicular às linhas de indução. Medindo-se a força magnética que atuou no condutor para diversos valores da corrente que o percorria, obteve-se a tabela seguinte:

- Usando os dados da tabela, construa o gráfico $F \times i$. Você já esperava obter um gráfico com esta forma?
- Calcule a inclinação deste gráfico. O que significa este valor?
- Sabendo-se que o comprimento do condutor era $L = 5,0$ cm, determine, usando sua resposta de (b), o valor do campo magnético.

i (A)	F (N)
1,0	$0,6 \times 10^{-2}$
2,0	$1,2 \times 10^{-2}$
3,0	$1,8 \times 10^{-2}$
4,0	$2,4 \times 10^{-2}$
5,0	$3,0 \times 10^{-2}$

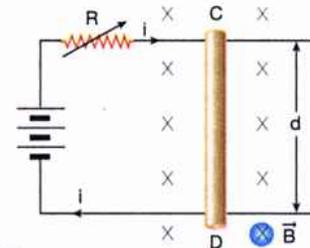
16. Na figura deste problema, suponha que o fio horizontal AC tenha 20 cm de comprimento e 5,0 g de massa e que o campo magnético do ímã seja uniforme e igual a 0,10 T. Sabendo-se que o fio está

suspense, em equilíbrio, na posição mostrada, determine a intensidade e o sentido da corrente que está passando através dele (considere $g = 10$ m/s²).



Problema 16.

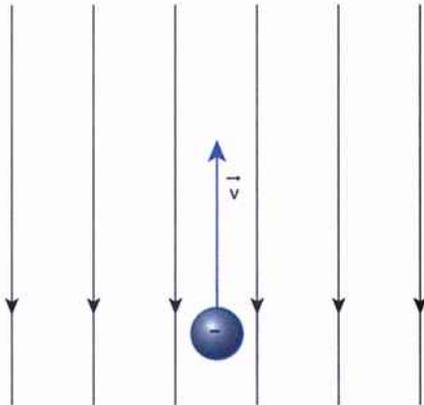
17. Uma barra CD, de massa $m = 200$ g, está apoiada sobre dois fios horizontais, separados de uma distância $d = 30$ cm, como mostra a figura deste problema. Nesta figura, R representa um reostato, e o campo magnético mostrado vale $B = 0,20$ T. Sabe-se que o coeficiente de atrito estático entre a barra CD e os fios horizontais é $\mu_e = 0,30$. Aumentando-se, através do reostato, a intensidade da corrente que passa na barra, para qual valor desta corrente a barra CD começará a se mover (considere $g = 10$ m/s²)?



Problema 17.

- Descreva qual a orientação que uma agulha magnética tomaria se fosse colocada exatamente no pólo sul magnético da Terra.
 - Então, qual é a direção e o sentido do campo magnético terrestre neste ponto?
19. Considere um ciclotron, como aquele que foi descrito no Tópico Especial deste capítulo. Mostre que o tempo decorrido entre a entrada e a saída de um íon em um D do ciclotron é dado por $\Delta t = \pi m/Bq$, onde m e q são a massa e a carga do íon e B é o valor do campo magnético existente no ciclotron.
20. No problema 17, suponha que, após a barra iniciar seu movimento (partindo do repouso), a corrente através dela seja mantida constante, com o valor $i = 10$ A. Se o coeficiente de atrito cinético entre a barra e os fios é $\mu_c = 0,20$, calcule a distância que esta barra percorre em 0,60 s (considere $g = 10$ m/s²).

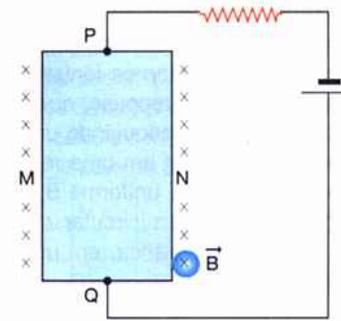
21. Explique por que as linhas de indução não devem ser chamadas de linhas de força do campo magnético.
22. Suponha que a resistência interna (das espiras) do amperímetro mostrado na fig. 22-22 seja igual a $2,0 \Omega$. Como podemos observar na figura, a máxima deflexão do ponteiro (a partir do zero central) ocorre quando ele é percorrido por uma corrente de 5 A .
- Procure descobrir como se procede, na prática, para que seja possível usar este aparelho para medir correntes superiores a 5 A (mantendo a posição do zero central).
 - Calcule o valor da resistência que deve ser associada à resistência interna do aparelho para que ele seja capaz de medir correntes de até 25 A (mantendo o zero central).
23. Uma partícula de massa m , eletrizada negativamente, é lançada com velocidade \vec{v} em um campo uniforme, cujas linhas estão representadas na figura deste problema (\vec{v} é paralela às linhas do campo). Suponha que nenhuma outra força, além daquela que poderia ser exercida pelo campo, atue sobre a partícula. Diga o tipo de movimento que a partícula terá, supondo que as linhas representem um
- campo elétrico.
 - campo magnético.
 - campo gravitacional.



Problema 23.

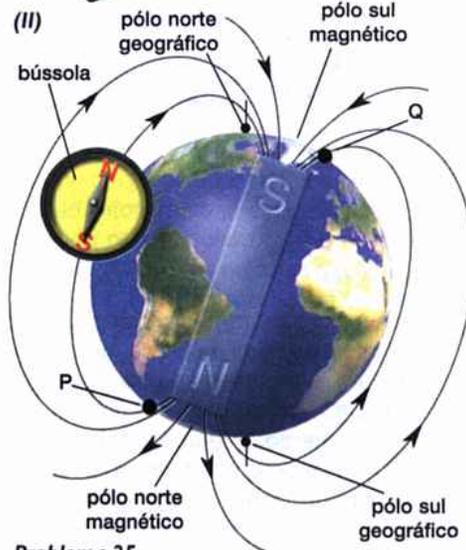
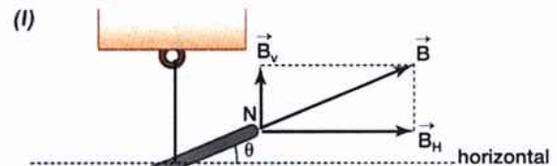
24. Uma placa metálica é ligada, nos pontos P e Q , aos pólos de uma bateria (veja a figura deste problema). Aplicando-se à placa o campo magnético uniforme \vec{B} , verifica-se que uma diferença de potencial V_{MN} aparece entre as laterais, M e N , da placa. Analise a situação apresentada e responda:
- Qual é o sentido do movimento dos elétrons na placa, em virtude da voltagem aplicada pela bateria?
 - Qual é o sentido do deslocamento dos elétrons, causado pelo campo magnético \vec{B} ?

- c) O potencial de M é maior ou menor do que o potencial de N ?



Problema 24.

25. Suspendendo-se uma pequena barra magnética por seu centro de gravidade, usando-se um fio flexível, verifica-se que ela toma uma posição inclinada em relação à superfície da Terra (fig. I, deste problema), isto é, ela forma um certo ângulo θ com a horizontal. Isto mostra que o campo magnético terrestre possui uma componente horizontal \vec{B}_H e uma componente vertical \vec{B}_V .

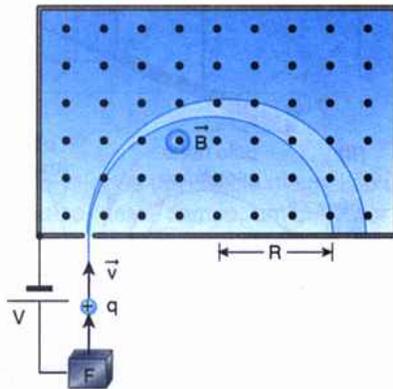


Problema 25.

- Observe a fig. II deste problema, que mostra as linhas do campo magnético da Terra, e responda:
- Qual o valor da componente \vec{B}_H , deste campo, no pólo norte magnético.
 - Na posição P , mostrada na fig. II, a componente \vec{B}_V aponta para cima ou para baixo?
 - Se a barra magnética for suspensa da maneira mostrada na fig. I, na posição Q da fig. II, ela ficará inclinada com seu pólo norte para cima ou para baixo?

26. A figura deste problema apresenta um aparelho denominado espectrômetro de massa, muito usado na Química e na Física Moderna para se medir a massa do átomo de um elemento químico. Uma fonte F produz átomos ionizados, com carga $+q$, praticamente em repouso, que são acelerados por uma voltagem V , adquirindo uma velocidade v . Esses íons penetram em uma região onde existe um campo magnético uniforme \vec{B} , na qual descrevem uma trajetória semicircular de raio R , atingindo uma chapa fotográfica, em um ponto que fica ali registrado.

- Mostre que a velocidade v com que um íon penetra no campo magnético é dada por $v = \sqrt{2qV/m}$.
- Observou-se que um feixe de íons, de mesma carga $+q$, constituído por isótopos de um mesmo elemento, ao penetrar na região onde existe o campo magnético, dividiu-se em dois feixes, como mostra a figura. Explique por que ocorreu esta separação.
- Deduza uma expressão que forneça a massa m de cada isótopo quando é conhecido o valor da carga q e são medidos B , R e V .

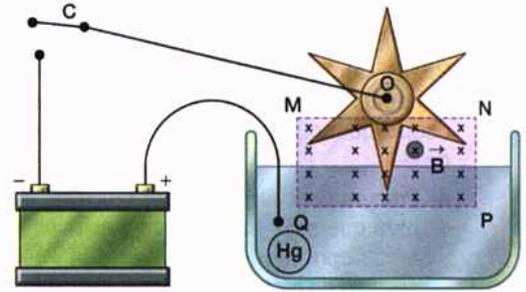


Problema 26.

27. Um dispositivo muito encontrado em antigos laboratórios de ensino de Física, denominado roda de Barlow, é representado na figura deste problema. Ele é constituído por uma roda dentada metálica, que pode girar em torno do eixo O , e por um recipiente contendo mercúrio, no qual há sempre um dente mergulhado. Um dos pólos de uma bateria é ligado ao eixo O da roda, enquanto o outro pólo é posto em contato com o mercúrio, que, como você sabe, é um metal líquido. Um campo magnético \vec{B} é aplicado perpendicularmente ao plano da roda, na região $MNPQ$ mostrada na figura (por exemplo, por meio de um ímã em forma de U, que abarca a roda entre seus pólos).

- Observando a figura, descreva o que ocorre com a roda dentada quando a chave C é fechada.

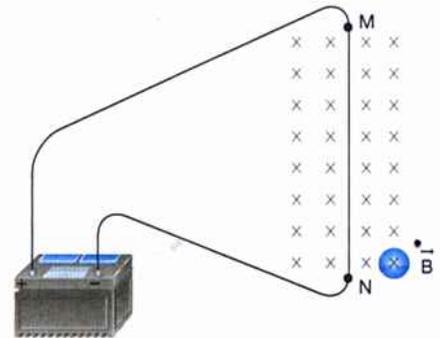
- A roda de Barlow funciona de maneira semelhante a um aparelho estudado neste capítulo. Qual é este aparelho?



Problema 27.

28. Um fio metálico MN é ligado a uma bateria e colocado verticalmente dentro de um campo magnético uniforme \vec{B} , da maneira mostrada na figura deste problema.

- Trabalhando com a corrente convencional, determine a direção e o sentido da força magnética \vec{F} que atua no fio MN .
- Como sabemos, a corrente real que existe em MN é constituída por elétrons em movimento. Qual é o sentido da corrente de elétrons em MN ?
- Trabalhando com a corrente de elétrons, determine a direção e o sentido da força magnética \vec{F} que atua em MN .
- Sua resposta à questão (c) concorda com a resposta encontrada na questão (a)?

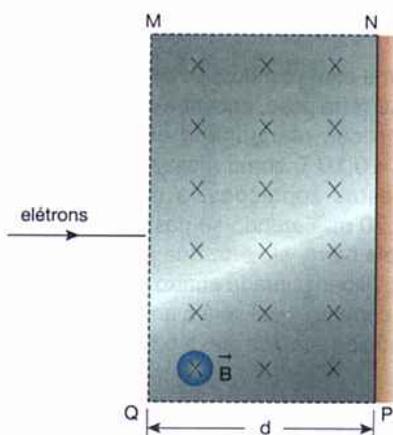


Problema 28.

Observação: A solução desse problema é uma confirmação do que foi dito anteriormente: a corrente de elétrons em um fio é equivalente à corrente convencional.

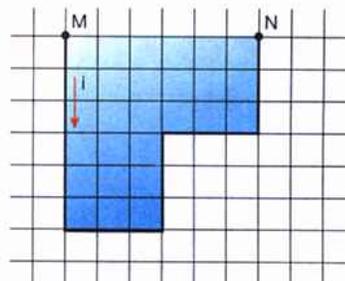
29. Um feixe de elétrons, cada um com energia cinética E_c , penetra em uma região $MNPQ$, onde existe um campo magnético \vec{B} , como mostra a figura deste problema. A uma distância d do ponto onde os elétrons entram no campo, existe uma placa NP . Determine o mínimo valor do módulo de

\vec{B} para que nenhum elétron do feixe atinja a placa. Exprese sua resposta em termos de E_c , de d , da massa m do elétron e do módulo q de sua carga.



Problema 29.

30. O condutor rígido MN , com a forma mostrada na figura deste problema, está colocado em uma região onde existe um campo magnético uniforme \vec{B} , perpendicular ao plano da figura e saindo da página. O condutor é percorrido por uma corrente i , no sentido mostrado. Sendo d o comprimento do lado de cada malha, calcule o módulo da força magnética resultante \vec{R} que atua no condutor MN .



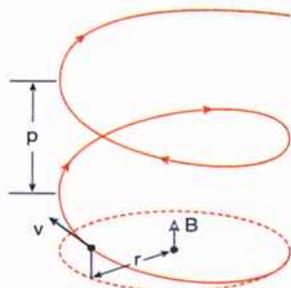
Problema 30.

Resolver questões de vestibular questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

problemas suplementares problemas suplementares

- Um próton é lançado com velocidade \vec{v} , dentro de um campo magnético uniforme, \vec{B} , vertical, para cima. A velocidade \vec{v} do próton forma um ângulo θ com a horizontal e, nessas condições, a partícula descreve uma trajetória helicoidal (hélice), como aquela mostrada na figura deste problema (apresente as respostas das questões seguintes em função de v , θ , B e da massa m e da carga q do próton).
 - Determine o raio r da trajetória helicoidal.
 - Calcule o período do movimento do próton.
 - A distância p , mostrada na figura, é denominada passo da hélice. Determine seu valor.

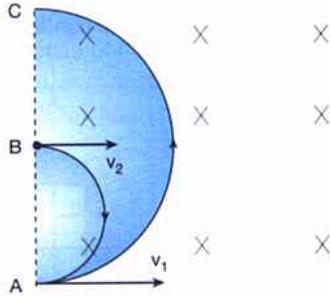


Problema suplementar 1.

- Suponha que uma pessoa decidisse caracterizar o campo magnético por meio de um vetor \vec{D} , em lugar do vetor \vec{B} que já conhecemos. Este vetor foi definido pela relação $\vec{D} = \vec{F}/q$, onde \vec{F} é a força magnética que atua na carga q (observe que a definição de \vec{D} foi feita por analogia com a definição do vetor campo elétrico \vec{E}). Explique por que o vetor \vec{D} , assim definido, não seria adequado para caracterizar um campo magnético.
- Uma partícula neutra (carga total nula) está em repouso em um campo magnético uniforme \vec{B} . Em um dado instante, ela se desintegra em duas partículas eletrizadas, P_1 e P_2 , de mesma massa m , que partem em sentidos opostos com velocidades perpendiculares a \vec{B} . Decorrido um intervalo de tempo Δt após a desintegração, P_1 e P_2 colidirão, sem ter saído do campo. Obtenha a fórmula que fornece Δt em termos de B , de m e do módulo q da carga de cada partícula.
- A figura deste problema representa as trajetórias de duas partículas eletrizadas, P_1 e P_2 , que penetram num campo magnético uniforme orientado perpendicularmente para dentro do plano do papel.

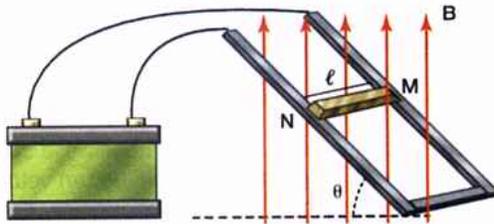
A partícula P_1 penetra no ponto A e sai em C, enquanto P_2 penetra em B e sai em A.

- Quais são os sinais das cargas q_1 e q_2 dessas partículas?
- Se $|q_1| = |q_2|$, $v_1 = v_2$ e $AB = BC$, qual é a relação entre as massas m_1 e m_2 das partículas?



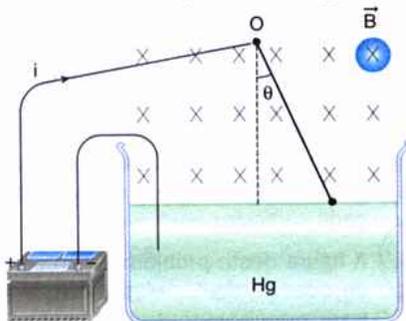
Problema suplementar 4.

- Uma barra condutora metálica MN está apoiada sobre dois trilhos, também condutores, separados por uma distância $\ell = 1,0$ m (veja a figura deste problema). Os trilhos são muito lisos e formam com a horizontal um ângulo $\theta = 45^\circ$. Existe na região um campo magnético vertical, para cima, de módulo $B = 0,20$ T. A bateria fornece uma corrente i à barra, tal que ela permanece em equilíbrio na posição mostrada. Sabendo que a massa da barra é $m = 100$ g, determine a intensidade e o sentido da corrente i (considere $g = 10$ m/s²).



Problema suplementar 5.

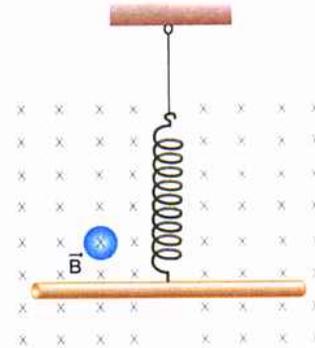
- Uma barra metálica, de comprimento $\ell = 20$ cm e de massa $m = 60$ g, é articulada sem atrito em um ponto O, como mostra a figura deste problema. Na região onde a barra se encontra há um campo magnético de módulo $B = 0,20$ T (veja a figura). Quando a barra toca a superfície do Hg contido no



Problema suplementar 6.

recipiente mostrado, uma corrente i , fornecida pela bateria, é estabelecida nessa barra. Verifica-se, então, que ela fica em equilíbrio nesta posição, formando um ângulo $\theta = 30^\circ$ com a vertical. Considerando $g = 10$ m/s², calcule o valor de i .

- Uma barra condutora, de 1,0 m de comprimento e 2,0 N de peso, encontra-se suspensa em uma mola vertical, mergulhada em um campo magnético $B = 0,10$ T, como mostra a figura deste problema. Nestas condições, a mola está deformada de 0,20 m. Fazendo-se passar uma corrente $i = 10$ A pela barra, ela é trazida para uma nova posição de equilíbrio, situada abaixo da anterior. Desligando-se a corrente, qual será a amplitude do movimento harmônico simples que a barra passa a executar?

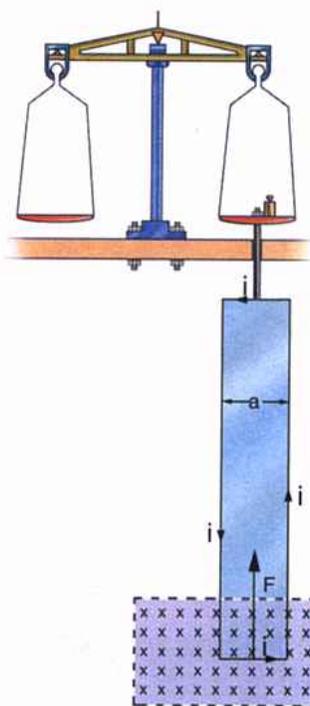


Problema suplementar 7.

- Suponha que uma espira de forma quadrada, transportando uma corrente, seja colocada em um campo magnético uniforme, com seu plano paralelo ao vetor \vec{B} .
 - Ao ser abandonada, a espira começa a girar, mas em virtude de forças de atrito ela tende a chegar ao repouso em uma certa posição. Qual é o ângulo entre \vec{B} e o plano da espira nesta posição?
 - Supondo que a espira seja flexível, qual seria a forma que ela tenderia a tomar naquela posição de repouso sob a ação das forças magnéticas?
- A figura deste problema apresenta um dispositivo com o qual se consegue medir a intensidade de um campo magnético com grande precisão. Resolvendo este problema, você entenderá como esta medida é feita.

Na figura, o retângulo suspenso em um dos pratos da balança é, na realidade, constituído por 10 espiras superpostas, cada uma percorrida por uma corrente $i = 0,10$ A. A parte inferior das espiras está mergulhada no campo magnético \vec{B} , que se deseja medir, e a balança foi equilibrada nessas condições. Invertendo-se o sentido da corrente nas espiras, verifica-se que uma massa $m = 8,6$ g deve ser colocada no prato da esquerda para restaurar o

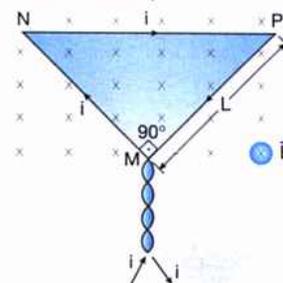
equilíbrio da balança. Sabendo-se que a largura da espira é $a = 10 \text{ cm}$, determine o módulo de B (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$).



Problema suplementar 9.

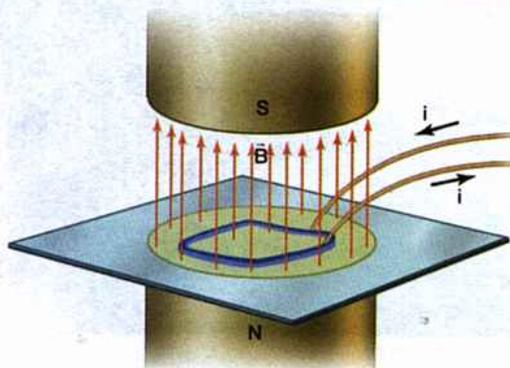
10. Na figura 22-21 deste capítulo, o plano da espira está paralelo ao vetor \vec{B} . Calcule o valor do momento M (torque) que atua na espira, em relação ao eixo OP , devido à ação das forças magnéticas sobre ela. Expresse sua resposta em função de B , de i e da área A da espira.
11. Em uma certa experiência, um feixe de partículas eletrizadas é lançado dentro de uma região onde existe um campo magnético uniforme B . Observa-se que o feixe se divide em vários outros, cada um de forma circular (de raios diferentes). Sabendo-se que o valor da razão carga/massa é o mesmo para todas as partículas do feixe incidente, responda:
 - a) As partículas desse feixe possuem a mesma velocidade?
 - b) As partículas, nas diferentes trajetórias circulares, possuem períodos diferentes?
12. Na linha do Equador, o campo magnético da Terra é praticamente horizontal, aponta para o norte, e seu módulo é cerca de $1,0 \times 10^{-4} \text{ T}$. Um trecho retilíneo de uma linha de transmissão, situada nas proximidades do Equador, com 100 m de comprimento, transporta uma corrente contínua de 700 A , dirigida de leste para oeste. Determine o módulo, a direção e o sentido da força exercida pelo campo magnético da Terra sobre este trecho da linha de transmissão.

13. Uma espira rígida, em forma de um triângulo retângulo isósceles, encontra-se imersa em um campo magnético uniforme \vec{B} , perpendicular ao seu plano, como mostra a figura deste problema. Sabe-se que $B = 0,10 \text{ T}$, que o lado menor da espira vale $L = 30 \text{ cm}$ e que ela é percorrida por uma corrente $i = 10 \text{ A}$.
 - a) Determine o módulo de cada uma das forças magnéticas que atuam nos lados menores MN e MP da espira.
 - b) Qual é o módulo da força magnética que atua no lado maior NP ?
 - c) Calcule o módulo da resultante das forças magnéticas que atuam na espira.



Problema suplementar 13.

14. Um feixe de partículas eletrizadas, aceleradas a partir do repouso por uma diferença de potencial de 320 V , penetra em um campo magnético uniforme, de módulo $B = 6,0 \times 10^{-4} \text{ T}$, orientado perpendicularmente à velocidade das partículas do feixe. Observa-se que a trajetória das partículas no campo magnético tem um raio $R = 10,0 \text{ cm}$. Procure identificar qual o tipo de partículas que constitui o feixe, sabendo-se que se trata de uma das seguintes partículas: *pósitrons* (elétrons positivos), *prótons* ou *déutrons* (núcleo do deutério).
15. Uma gominha elástica flexível e coberta com uma camada de tinta condutora de eletricidade é colocada em um campo magnético uniforme, da maneira mostrada na figura deste problema. Por meio de conexões elétricas, faz-se passar uma corrente na gominha com o sentido indicado na figura. Qual a forma que a gominha irá adquirir sob a ação das forças magnéticas que nela atuam?

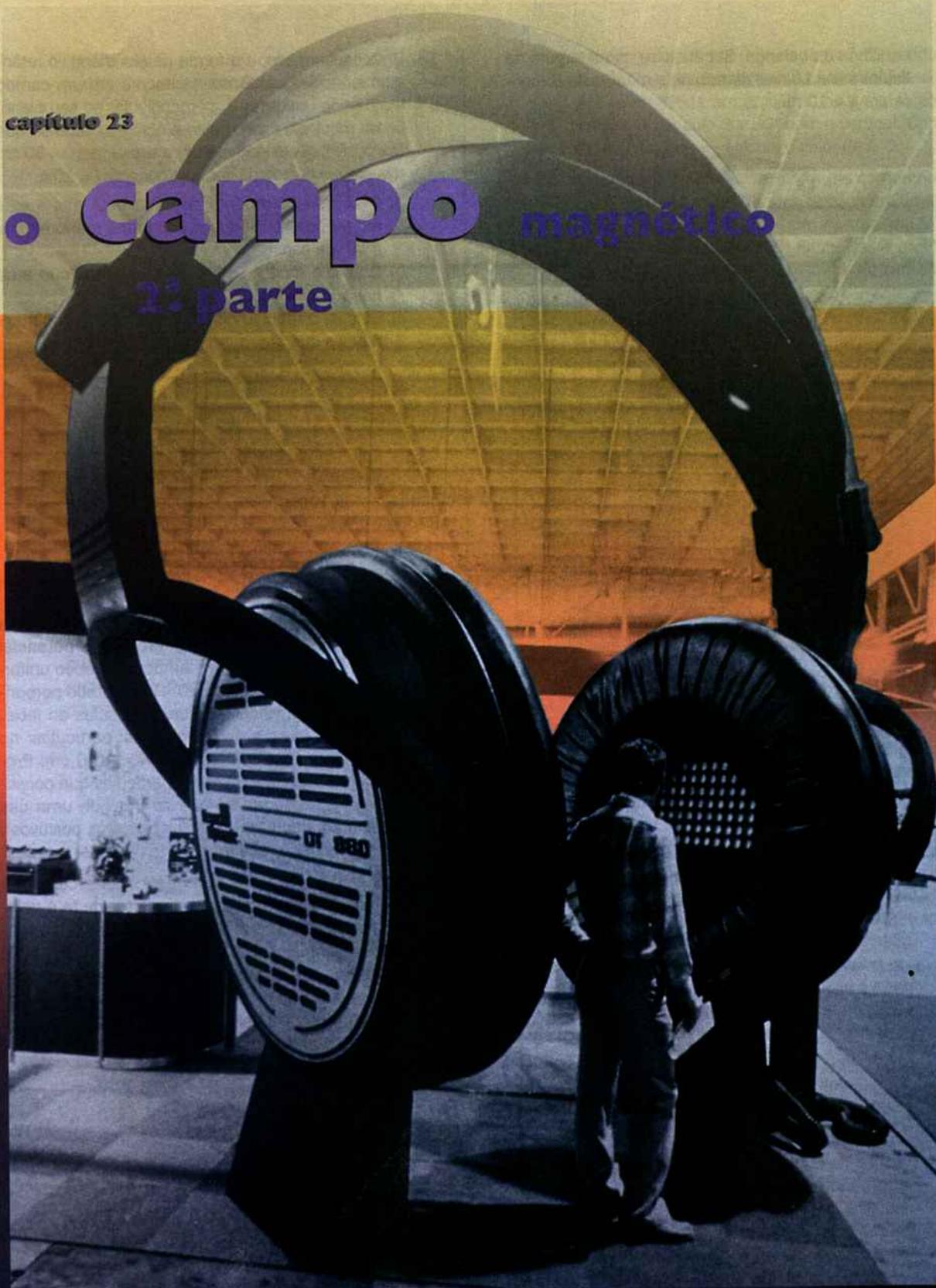


Problema suplementar 15.

capítulo 23

o campo magnético

2ª parte



Hulton/Getty Images

Nos alto-falantes, uma corrente elétrica produz um campo magnético. Neste capítulo, estudaremos este fenômeno.

No capítulo anterior vimos que a experiência de Oersted levou à conclusão de que as cargas elétricas em movimento (uma corrente elétrica) criam um campo magnético no espaço em torno delas.

Entretanto, não nos preocupamos, até agora, em analisar a relação entre o campo magnético e as correntes elétricas que originaram este campo. Neste capítulo, estudaremos os campos magnéticos que são estabelecidos por alguns tipos particulares de condutores percorridos por uma corrente elétrica. Analisaremos, inicialmente, o campo criado por um condutor retilíneo; em seguida, o campo estabelecido no centro de uma espira circular; e, finalmente, o campo magnético no interior de um certo conjunto de espiras, denominado *solenóide*.

23.1. Campo magnético de um condutor retilíneo

DIREÇÃO E SENTIDO DO VETOR \vec{B}

Consideremos um condutor retilíneo AC bastante comprido, percorrido por uma corrente, como mostra a fig. 23-1. Em torno deste condutor existe um campo magnético \vec{B} que estudaremos a seguir. Para isto, vamos colocar uma agulha magnética em diversas posições em torno de AC . Como sabemos, a orientação da agulha nos indicará a direção e o sentido do campo magnético em cada ponto.

Na fig. 23-2-a vemos um corte do condutor AC , com a corrente i que o percorre saindo da folha de papel e agulhas magnéticas colocadas em alguns pontos próximos ao condutor. Observando a orientação que a agulha toma em cada ponto, podemos traçar o vetor \vec{B} que representa o campo magnético, criado pelo condutor, naqueles pontos (veja a fig. 23-2-a). Assim, a experiência nos mostra que a corrente no fio cria um campo magnético cujas linhas de indução envolvem o condutor, apresentando uma forma circular, com centro sobre ele (fig. 23-2-b).

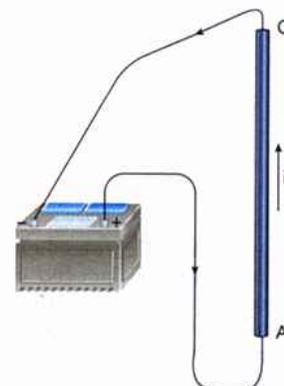


Fig. 23-1: Esquema de fio retilíneo, comprido, conduzindo uma corrente elétrica de intensidade i .

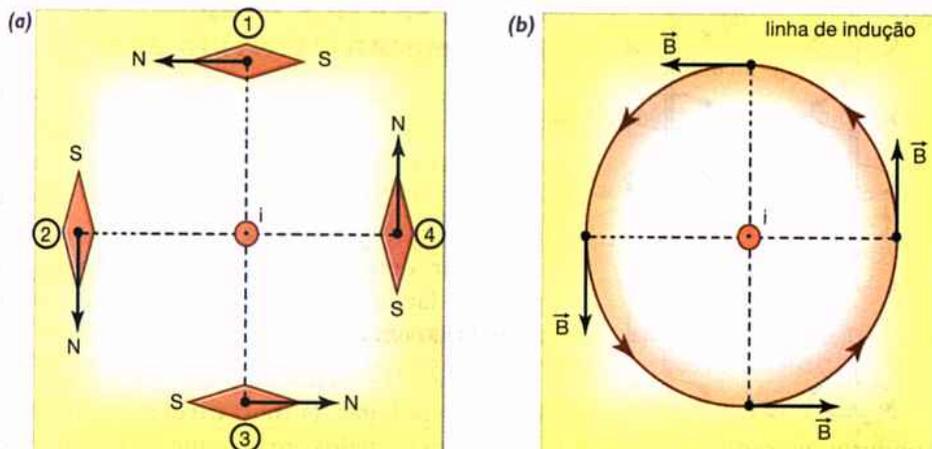


Fig. 23-2: O mesmo condutor mostrado na fig. 23-1, visto agora em direção perpendicular à folha de papel. São vistos também os vetores \vec{B} que a corrente cria em torno do fio.

É fácil perceber que podemos traçar várias linhas de indução para representar o campo magnético a diversas distâncias do condutor, como foi feito na fig. 23-3-a. Para materializar estas linhas de indução, podemos usar limalha

de ferro, como já descrevemos no capítulo anterior. A fig. 23-3-b é uma fotografia das linhas de indução do campo criado por um fio reto e comprido, obtida desta maneira.

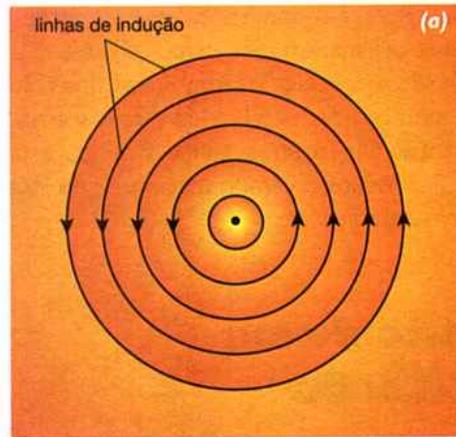


Fig. 23-3: Representação das linhas de indução do campo magnético criado por um condutor retilíneo, perpendicular à folha de papel e saindo dela.

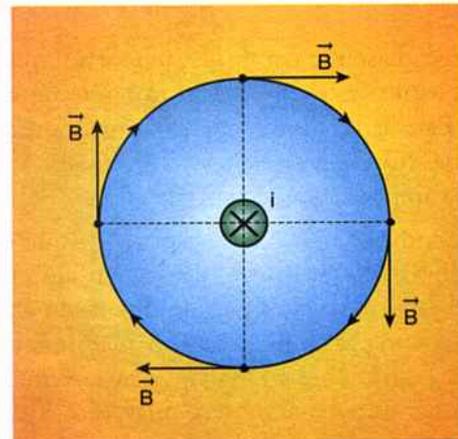
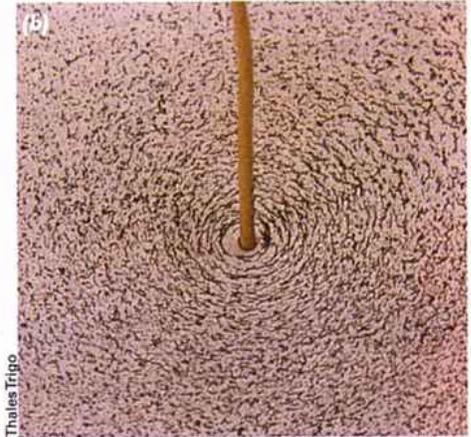


Fig. 23-4: Representação das linhas de indução do campo magnético criado por um condutor retilíneo, perpendicular à folha de papel e penetrando nela.

A fig. 23-4 nos mostra o que acontece quando o sentido da corrente no condutor é invertido (penetrando na folha de papel). Podemos observar que, nestas condições, as linhas de indução continuam com a mesma forma, porém o sentido do vetor \vec{B} se inverte (veja a fig. 23-4 e compare com a fig. 23-2-b).

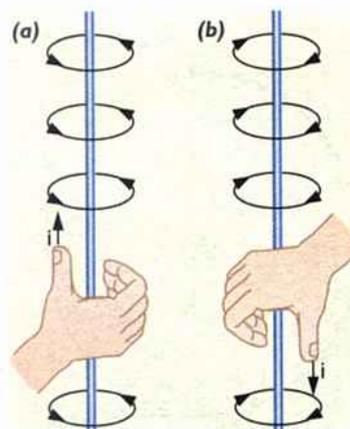


Fig. 23-5: Esquema da aplicação da regra de Ampère para obter o sentido do campo magnético criado em torno de um fio que conduz uma corrente elétrica.

REGRA PRÁTICA PARA DETERMINAR O SENTIDO DE \vec{B}

Como acabamos de ver, as linhas de indução em torno de um condutor retilíneo são sempre circulares, mas o seu sentido (portanto, o sentido de \vec{B}) depende do sentido da corrente no fio. Uma regra prática muito usada, que costuma ser denominada *regra de Ampère*, nos permite facilmente obter o sentido do campo magnético em torno do fio.

A fig. 23-5-a ilustra o uso desta regra: dispondo o polegar da **mão direita** ao longo do condutor, no sentido da corrente, e os demais dedos envolvendo o condutor, estes dedos nos indicarão o sentido das linhas de indução (observe a figura). Na fig. 23-5-b, a mesma regra está sendo usada com a corrente no condutor em sentido contrário ao da fig. 23-5-a. Observe que a regra de Ampère nos indica que a orientação das linhas de indução é contrária àquela da fig. 23-5-a, como já tínhamos visto anteriormente.

FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE \vec{B}

Uma vez conhecida a maneira de determinar a direção e o sentido do campo magnético criado por um condutor retilíneo, os cientistas procuraram realizar experiências que lhes fornecessem informações sobre o *módulo* deste campo.

Para apresentar as conclusões a que estes cientistas chegaram, consideremos a fig. 23-6. Sendo B o módulo do campo magnético que a corrente i estabelece a uma distância r do condutor, eles verificaram que:

- 1ª) B é diretamente proporcional a i : $B \propto i$
 - 2ª) B é inversamente proporcional a r : $B \propto 1/r$
- Logo, podemos escrever:

$$B \propto \frac{i}{r}$$

Assim, em resumo, temos:

as linhas de indução do campo magnético criado pela corrente em um fio condutor reto e comprido são círculos com centro sobre o condutor e orientadas com um sentido que pode ser determinado pela regra de Ampère (fig. 23-5). O módulo B deste campo, em um ponto, é diretamente proporcional à intensidade da corrente i no fio e inversamente proporcional à distância do ponto ao condutor, isto é,

$$B \propto \frac{i}{r}$$

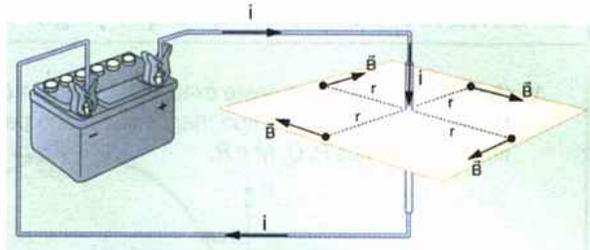


Fig. 23-6: O campo magnético \vec{B} , criado por uma corrente i , a uma distância r do fio é tal que $B \propto i$ e $B \propto (1/r)$.

Exemplo

Um fio retilíneo transporta uma corrente i com o sentido indicado na fig. 23-7-a.

- a) Indique, na figura, a direção e o sentido do campo magnético criado pelo fio nos pontos M e N.

Aplicando a regra de Ampère, concluímos facilmente que em M temos um campo magnético perpendicular à folha de papel e penetrando nela, como mostra a fig. 23-7-b. Vemos, ainda, que no ponto N o vetor \vec{B} está saindo da folha de papel (veja a fig. 23-7-b).

- b) Sabendo-se que o módulo do campo magnético nos pontos M e N é $B = 4,0 \times 10^{-4}$ T, qual será o módulo, a direção e o sentido do campo magnético nos pontos P e Q?

A própria regra de Ampère nos mostra que em P e Q teremos o vetor \vec{B} com as orientações mostradas na fig. 23-7-b.

Observemos, agora, que os pontos P e Q estão situados a uma distância do fio duas vezes maior do que os pontos M e N. Como $B \propto 1/r$, concluímos que em P e Q o módulo de \vec{B} será duas vezes menor do que em M e N. Logo, em P e Q teremos

$$B = \frac{4,0 \times 10^{-4}}{2} \quad \text{ou} \quad B = 2,0 \times 10^{-4} \text{ T}$$

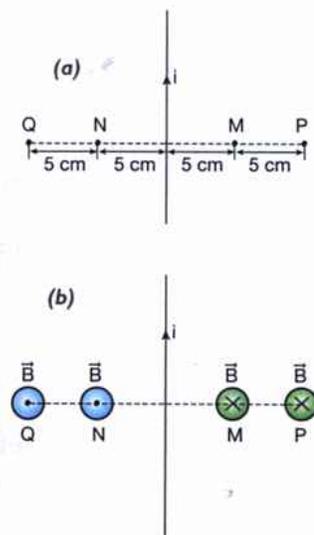
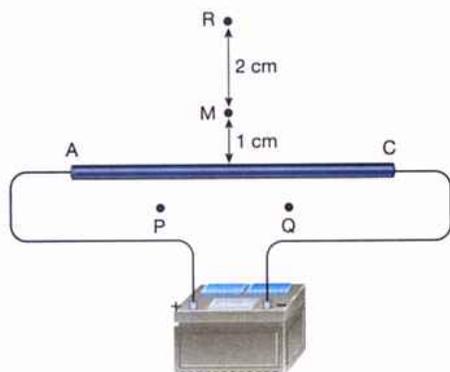


Fig. 23-7: Para o exemplo da secção 23.1.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

1. Considerando a figura deste exercício, indique a direção e o sentido do campo magnético criado pelo fio AC nos pontos P, Q, M e R.

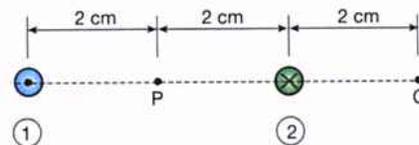


Exercício 1.

2. No exercício anterior, considere que o valor do campo magnético em M seja $B_M = 6,0 \times 10^{-4}$ T. Supondo que a intensidade da corrente no fio AC tenha sido duplicada, responda qual será, então:
- O valor do campo magnético em M.
 - O valor do campo magnético em R.
3. A figura deste exercício representa dois condutores retilíneos horizontais, (1) e (2), vistos em corte,

transportando as correntes $i_1 = 30$ A e $i_2 = 15$ A com os sentidos ali indicados. Considerando o ponto P da figura:

- Indique a direção e o sentido de cada um dos campos magnéticos \vec{B}_1 e \vec{B}_2 criados pelos fios (1) e (2) neste ponto.
- Sabendo-se que $B_1 = 3,0 \times 10^{-4}$ T, qual será, então, o módulo de \vec{B}_2 ?
- Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético resultante, \vec{B} , estabelecido pelos dois fios no ponto P.



Exercício 3.

4. Considerando, agora, o ponto Q mostrado na figura do exercício anterior, responda:
- Qual é a direção e o sentido do vetor \vec{B}_1 neste ponto? E do vetor \vec{B}_2 ?
 - Qual é o valor de \vec{B}_1 ? E o de \vec{B}_2 ?
 - Qual é o módulo, a direção e o sentido do campo magnético resultante, \vec{B} , no campo Q?

23.2. Campo magnético no centro de uma espira circular

DIREÇÃO E SENTIDO DO VETOR \vec{B}

Consideremos um fio condutor ao qual foi dada a forma de uma circunferência, constituindo o que costumamos denominar uma *espira circular*. Se esta espira for percorrida por uma corrente elétrica, como mostra a fig. 23-8, já sabemos que esta corrente irá estabelecer um campo magnético no espaço em torno da espira. Entretanto, vamos examinar apenas o campo magnético em seu centro.

Para fazer este estudo, coloquemos uma pequena agulha magnética no centro da espira. Observando sua orientação, verificamos que o vetor \vec{B} neste ponto é perpendicular ao plano da espira e tem o sentido indicado na fig. 23-8.

Se invertermos o sentido da corrente, verificaremos que o vetor \vec{B} continua perpendicular ao plano da espira, porém tem o seu sentido invertido. A regra prática de Ampère pode ser usada, também aqui, para determinar o sentido do campo magnético. Na fig. 23-9, usando esta regra, vemos que ela nos fornece corretamente o sentido do vetor \vec{B} , que coincide com o sentido indicado na fig. 23-8.

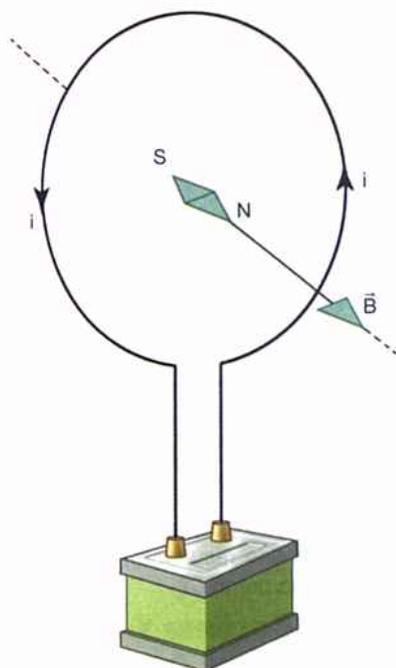


Fig. 23-8: Esquema de campo magnético criado no centro de uma espira circular na qual passa uma corrente elétrica.

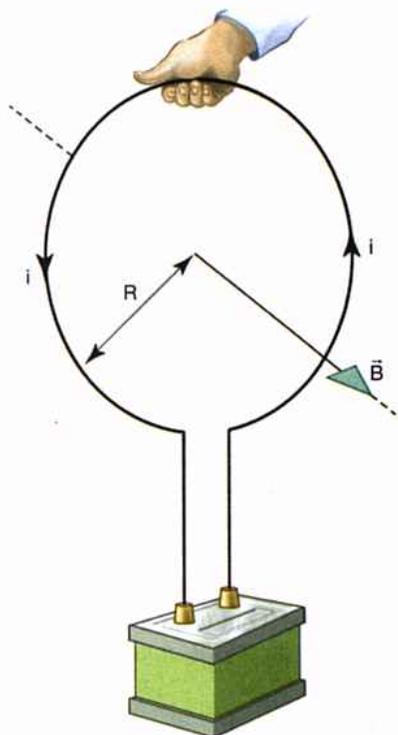


Fig. 23-9: A regra de Ampère pode ser usada para determinar o sentido de \vec{B} também neste caso.

FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE \vec{B}

Analisando o módulo, B , do campo magnético no centro de uma espira circular, verificou-se que o seu valor é proporcional à intensidade da corrente na espira, como acontecia no caso de um condutor retilíneo. Além disso, constatou-se que, quanto maior for a espira, menor será o valor do campo magnético em seu centro ou, mais precisamente, verificou-se que B é inversamente proporcional ao raio R da espira. Então, em resumo, temos

- 1º) B é diretamente proporcional a i : $B \propto i$
- 2º) B é inversamente proporcional a R : $B \propto 1/R$

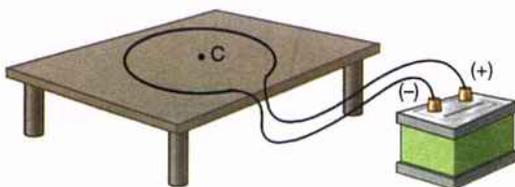
Então, podemos concluir que a seguinte relação é válida para o valor do campo magnético no centro de uma espira circular:

$$B \propto \frac{i}{R}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

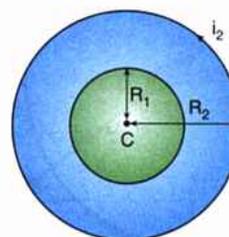
5. Uma espira circular, colocada sobre uma mesa horizontal, está ligada a uma bateria, como mostra a figura deste exercício. Usando a regra de Ampère, determine a direção e o sentido do campo magnético no centro C da espira.



Exercício 5.

6. Suponha que, no exercício anterior, o módulo do campo magnético no ponto C fosse $B = 2,0 \times 10^{-4}$ T. Qual seria o valor deste campo se a intensidade da corrente no fio fosse duplicada e o raio da espira fosse reduzido à metade?
7. Duas espiras circulares, de mesmo centro C , possuem raios $R_1 = 4,0$ cm e $R_2 = 12$ cm (veja a figura deste exercício). A espira de raio R_2 é per-

corrida por uma corrente $i_2 = 30$ A, no sentido mostrado na figura. Qual deve ser a intensidade e o sentido da corrente i_1 , que deverá percorrer a espira de raio R_1 , para que o campo magnético resultante, criado pelas duas espiras no ponto C , seja nulo?



Exercício 7.

8. No exercício anterior, sabe-se que o campo magnético estabelecido em C pela espira de raio R_2 vale $B_2 = 1,6 \times 10^{-4}$ T. Suponha agora que o sentido da corrente i_1 seja o mesmo da corrente i_2 . Nestas condições, qual será o módulo, a direção e o sentido do campo magnético resultante, estabelecido pelas duas espiras, no ponto C ?

23.3. Campo magnético de um solenóide

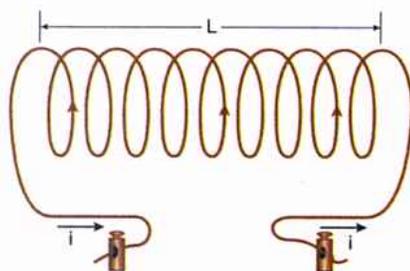


Fig. 23-10: Um solenóide é constituído por um condutor enrolado de modo a formar espiras sucessivas.

O QUE É UM SOLENÓIDE

Um condutor enrolado de modo a formar um conjunto de N espiras sucessivas, praticamente circulares, como aquele mostrado na fig. 23-10, é denominado *solenóide*. A palavra “bobina” pode ser usada como sinônimo de solenóide, embora, na realidade, bobina seja um termo mais geral, que designa qualquer tipo de enrolamento.

Ligando-se o solenóide a uma bateria, uma corrente elétrica circulará por suas espiras, estabelecendo um campo magnético em pontos tanto do interior quanto do exterior da bobina. Na fig. 23-11 estão apresentadas algumas linhas de indução deste campo magnético. Na fotografia mostrada na fig. 23-12 temos uma materialização destas linhas de indução, obtida por meio de limalhas de ferro distribuídas no campo magnético.

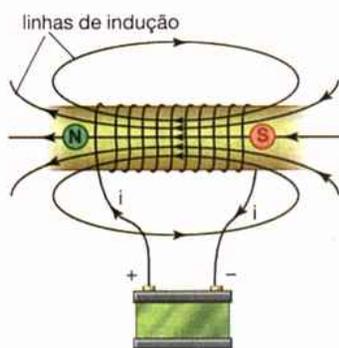


Fig. 23-11: Representação das linhas de indução do campo magnético criado por uma corrente que passa por um solenóide.

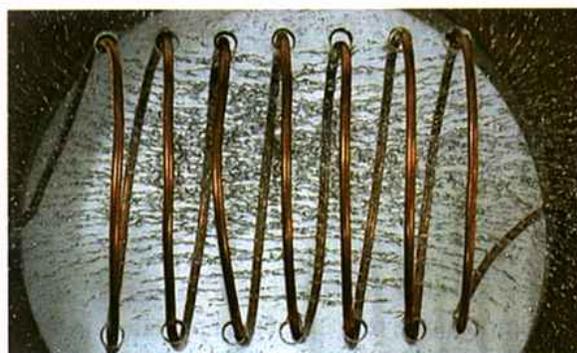


Fig. 23-12: Materialização das linhas de indução do campo magnético criado por um solenóide, usando limalhas de ferro.

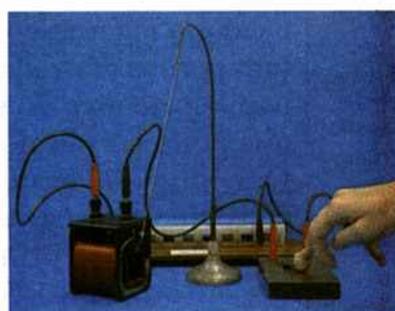
Prof. Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

Podemos observar, comparando as figuras 23-11 e 22-12-a (do capítulo anterior), que o campo magnético de um solenóide apresenta uma configuração muito semelhante à de um ímã em forma de barra. Portanto, um solenóide possui praticamente as mesmas propriedades magnéticas de um ímã. Por exemplo, um solenóide percorrido por uma corrente, suspenso de maneira que possa girar livremente, se orienta na direção norte-sul. Além disso, suas extremidades se comportam como os polos de um ímã, como está representado na fig. 23-11: a extremidade da qual as linhas de indução estão emergindo se comporta como um pólo norte e a extremidade na qual elas penetram no solenóide se comporta como um pólo sul. Por este motivo, podemos dizer que o solenóide constitui um *eletroímã*, isto é, um ímã obtido por meio de uma corrente elétrica.

DIREÇÃO E SENTIDO DE \vec{B} NO INTERIOR DO SOLENÓIDE

Conforme podemos perceber pela fotografia 23-12, as linhas de indução no interior do solenóide são paralelas ao seu eixo, isto é, o vetor \vec{B} , em qualquer ponto do interior do solenóide, tem aquela direção.

Para determinar o sentido de \vec{B} nestes pontos, podemos usar novamente a regra de Ampère. Considerando a espira de uma das extremidades da bobina e dispondo o polegar no sentido da corrente, os demais dedos indicarão se as linhas de indução, nesta extremidade, estão entrando no solenóide ou saindo dele. Por exemplo, na fig. 23-13-a os dedos indicam que as linhas de indução estão penetrando na extremidade F da bobina e, portanto, o campo magnético no interior do solenóide está dirigido de F para G , como mostra a figura. Invertendo-se o sentido da corrente nas espiras, o sentido do campo magnético no interior do solenóide também se inverterá, como nos mostra a aplicação da regra de Ampère feita na fig. 23-13-b.



Uma bobina, percorrida por uma corrente, se comporta como um ímã. As extremidades da bobina se comportam como os polos do ímã, atraindo pedaços de ferro. *

Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

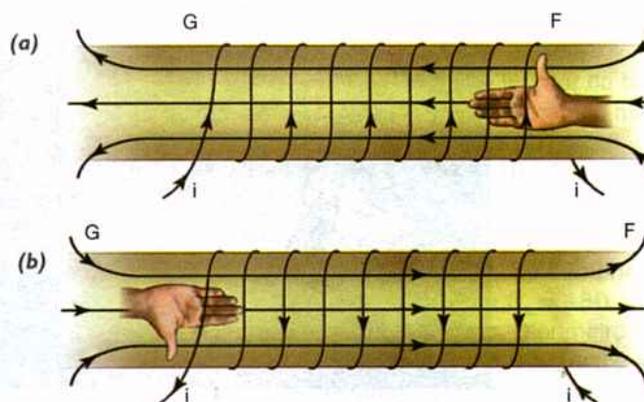


Fig. 23-13: Esquema de aplicação da regra de Ampère para determinação do sentido das linhas de indução do campo magnético de um solenóide.

FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE \vec{B}

Consideremos um solenóide bastante comprido em comparação com o diâmetro de suas espiras. Verifica-se que em pontos do interior deste solenóide, não muito próximos de suas extremidades, o campo magnético é uniforme, isto é, o vetor \vec{B} é praticamente o mesmo em qualquer um destes pontos.

Observa-se (como ocorre com os campos magnéticos estudados nas seções anteriores) que o módulo de \vec{B} no interior do solenóide é proporcional à intensidade da corrente que circula em suas espiras. Além disso, um outro fator importante tem influência no valor de \vec{B} : é o número de espiras por unidade de comprimento, que vamos representar por n . Este número é obtido dividindo-se o número total, N , de espiras pelo comprimento, L , do solenóide (fig. 23-10), isto é, $n = N/L$. Verifica-se que o valor de \vec{B} no interior do solenóide é proporcional a n . Então, temos:

1º) B é diretamente proporcional a i : $B \propto i$

2º) B é diretamente proporcional a n : $B \propto n$

Logo, podemos escrever:

$$B \propto ni$$

Chamamos a atenção para o fato de que, ao contrário do que poderia parecer, verifica-se que o valor de \vec{B} no interior de um solenóide comprido não é influenciado pelo raio de suas espiras.

Em resumo, podemos destacar:

o campo magnético no interior de um solenóide comprido (em pontos afastados de suas extremidades) é uniforme, paralelo ao eixo do solenóide e orientado com um sentido que pode ser obtido pela regra de Ampère (fig. 23-13). O módulo, B , deste campo é proporcional à intensidade da corrente (i) nas espiras e ao número de espiras por unidade de comprimento (n) do solenóide, isto é:

$$B \propto ni$$

Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP



Em (a) não há corrente na bobina e as agulhas são orientadas pelo campo magnético terrestre na direção norte-sul. Observe, em (b), como as agulhas são orientadas pelo campo magnético da bobina na qual passa uma corrente elétrica.

Exemplo

Um solenóide *FG* é percorrido por uma corrente elétrica no sentido indicado na fig. 23-14. Aproximando-se da extremidade *F* do solenóide o pólo sul de um ímã *I*, este pólo será atraído ou repellido por aquela extremidade?

Aplicando a regra de Ampère a uma espira da extremidade do solenóide, determinaremos o sentido do campo magnético em seu interior.

Na fig. 23-14, esta regra foi aplicada à espira da extremidade *G*, mostrando que as linhas de indução estão saindo desta extremidade. Então, *G* se comporta como um pólo norte e, conseqüentemente, *F* se comportará como um pólo sul. Nestas condições, concluímos que o ímã será repellido ao ter o seu pólo sul aproximado de *F*.

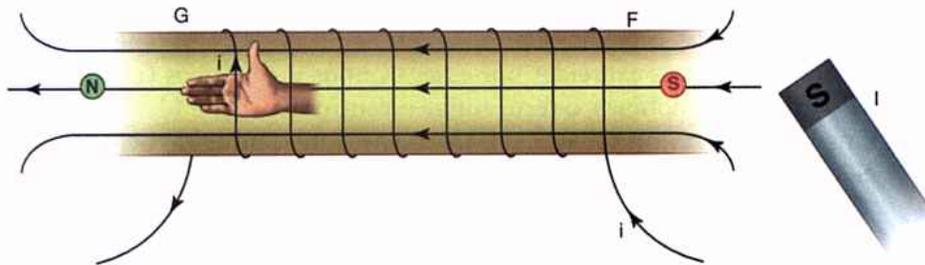
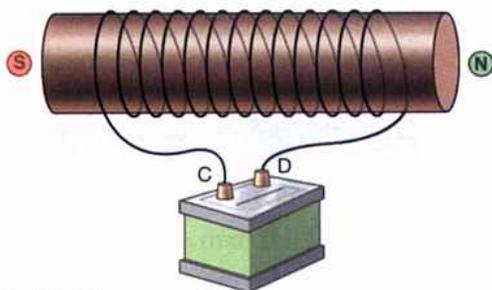


Fig.23-14: Para o exemplo da secção 23.3.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

9. Um solenóide *FG*, percorrido por uma corrente elétrica, foi suspenso de modo a poder girar livremente. Observou-se que ele se orientava na direção norte-sul, com sua extremidade *F* voltada para o norte geográfico da Terra.
 - a) A extremidade *F* deste eletroímã está se comportando como um pólo norte ou como um pólo sul?
 - b) Então, o campo magnético no interior do solenóide está dirigido de *G* para *F* ou de *F* para *G*?



Exercício 10.

10. Uma mola metálica foi ligada aos pólos *C* e *D* de uma bateria, verificando-se que suas extremi-

dades se comportavam como pólos norte e sul, como está indicado na figura deste exercício. Determine, então, qual é o pólo positivo da bateria.

11. Duas bobinas, (1) e (2), cada uma com 100 espiras e cujos comprimentos são $L_1 = 20$ cm e $L_2 = 40$ cm, são ligadas em série aos pólos de uma bateria.
 - a) A corrente que passa na bobina (1) é maior, menor ou igual àquela que passa na bobina (2)?
 - b) O campo magnético B_1 , no interior da bobina (1), é maior, menor ou igual ao campo magnético B_2 no interior da bobina (2)?
 - c) Sabendo-se que $B_1 = 6,0 \times 10^{-3}$ T, qual é o valor de B_2 ?
12. Considere dois solenóides, o primeiro com um número de espiras $N_1 = 120$, de comprimento $L_1 = 30$ cm, e o segundo com $N_2 = 180$ espiras e um comprimento $L_2 = 15$ cm. O primeiro é percorrido por uma corrente $i_1 = 6,0$ A. Qual é a corrente i_2 que devemos fazer passar no segundo para que o campo magnético seja o mesmo no interior dos dois solenóides?

Como se forma a imagem em um tubo de TV

Uma aplicação importante da força magnética, que atua em uma carga elétrica em movimento, é encontrada no funcionamento do tubo de imagens de um aparelho de TV. A fig. I mostra o esquema de um desses tubos, que é constituído essencialmente das seguintes partes:

- um canhão eletrônico, situado no extremo posterior do tubo, que é um dispositivo que emite um feixe de elétrons, acelerados por uma alta tensão de vários milhares de volts;
- um par de bobinas, que cria um campo magnético horizontal, e um outro par, que cria um campo magnético vertical. O feixe de elétrons (fig. I) passa entre essas bobinas, sendo, então, defletido horizontal e verticalmente pelas forças exercidas por esses campos magnéticos (quando não há corrente nas bobinas, o feixe atinge o centro da tela);
- uma tela, coberta com material fluorescente, que é atingido pelo feixe de elétrons, após ser defletido pelos campos magnéticos.

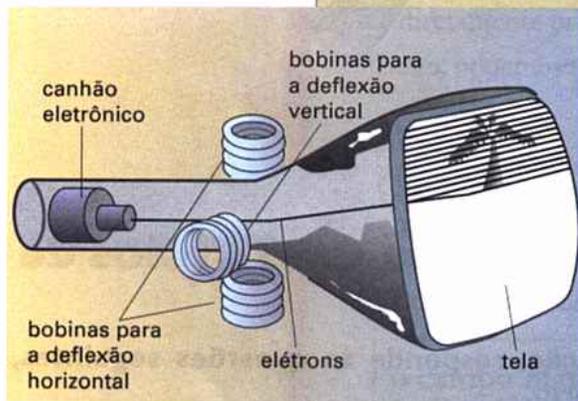


Fig. I: A imagem, em um aparelho de TV, é formada em virtude do impacto de elétrons sobre a tela fluorescente.

O impacto dos elétrons contra a tela produz uma pequena mancha luminosa em cada ponto atingido.

Os campos magnéticos das bobinas defletoras mudam periodicamente de sentido, de modo a fazer o feixe de elétrons percorrer, com enorme velocidade, toda a tela, de cima para baixo e da direita para a esquerda (dizemos que o feixe de elétrons varre toda a tela). Quando o aparelho de TV não está sintonizado em nenhum canal, esta “varredura” dá origem a um brilho praticamente uniforme na tela.

Ao sintonizarmos um determinado canal, os sinais captados pela antena modificam a varredura, fazendo com que certas partes da tela fiquem mais claras (recebam mais elétrons) e outras fiquem mais escuras (recebam menor número de elétrons). Com essas gradações de intensidade luminosa sobre a tela, são formadas as imagens em preto-e-branco, emitidas pelo canal sintonizado.

A formação da imagem em um aparelho de TV já foi analisada no Tópico Especial do capítulo 21 (no qual também se analisou sucintamente a formação da imagem em cores). Naquele Tópico Especial, o desvio do feixe de elétrons foi atribuído à ação de um campo elétrico. Entretanto, nos televisores atuais, este desvio é causado por campos magnéticos, da maneira que acabamos de descrever.

23.4. Influência do meio no valor do campo magnético

Nas seções anteriores analisamos os campos magnéticos criados por condutores de formas diversas sem, entretanto, nos referirmos ao *meio* no qual estes fios condutores estavam inseridos. É importante observar, porém, que este estudo foi feito supondo os condutores situados no ar (rigorosamente falando, os

condutores deveriam estar no vácuo, mas a diferença entre as duas situações — ar e vácuo — é insignificante).

Suponhamos, agora, que o condutor esteja mergulhado em um meio material (fig. 23-15-a) ou que um objeto qualquer seja aproximado dele (fig. 23-15-b). Verifica-se experimentalmente que, nestes casos, o valor do campo magnético em torno do fio é diferente daquele que existiria se o condutor estivesse situado no ar. Portanto, a presença de um meio material provoca modificações no campo magnético criado por uma corrente elétrica. A seguir, faremos uma análise destas modificações, procurando entender como e por que elas ocorrem.

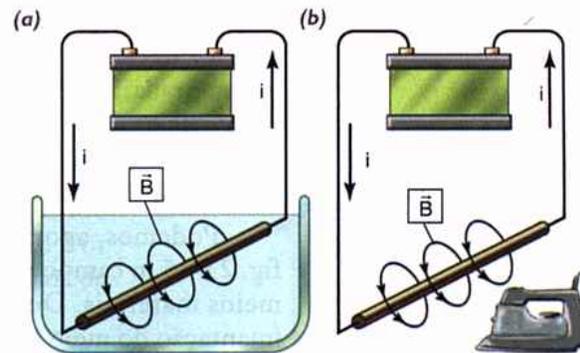


Fig. 23-15: A presença de um meio material provoca alterações no valor do campo magnético criado por uma corrente elétrica.

IMANTAÇÃO DE UM MATERIAL

Quando um campo magnético atua em um meio material qualquer, este meio sofre uma modificação e dizemos que ele se *imanta* (ou se magnetiza).

Para entendermos em que consiste esta imantação, devemos nos lembrar que, no interior de qualquer substância, existem correntes elétricas elementares, constituídas pelos movimentos dos elétrons nos átomos destas substâncias. Estas correntes elementares criam pequenos campos magnéticos, de modo que cada átomo pode ser considerado um pequeno ímã, isto é, um ímã elementar (fig. 23-16).

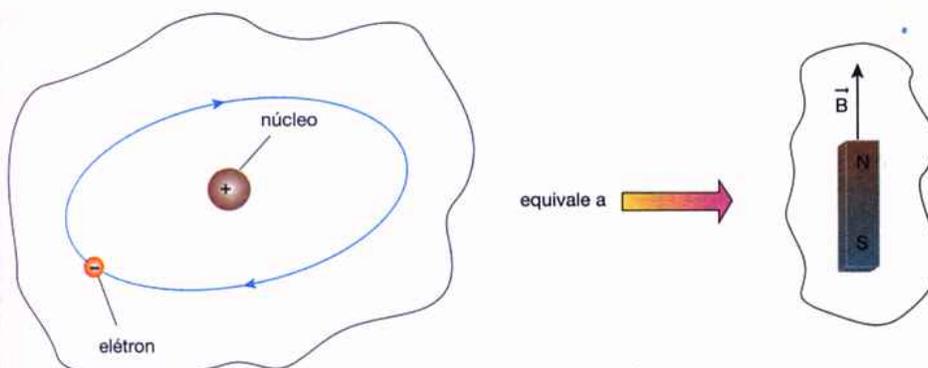


Fig. 23-16: Um átomo pode ser considerado um ímã elementar.

No interior de um material em seu estado normal (não-magnetizado), estes ímãs elementares encontram-se orientados inteiramente ao acaso (fig. 23-17-a), de modo que os campos magnéticos criados pelos átomos da substância tendem a se anular. Sendo nulo o campo magnético resultante estabelecido pela totalidade destes ímãs elementares, a substância não apresentará nenhum efeito magnético.

Entretanto, se este material for colocado dentro de um campo magnético \vec{B} , este campo atuará sobre os ímãs elementares, tendendo a orientá-los, como está mostrado na fig. 23-17-b. Em virtude desta orientação, os campos magnéticos elementa-

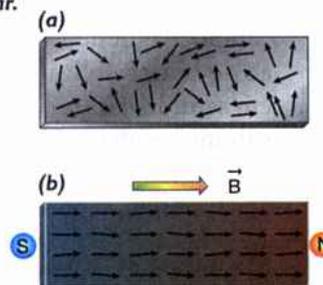


Fig. 23-17: Ilustração esquemática. Em uma barra não-imantada os ímãs elementares estão orientados ao acaso (a). Se a barra é colocada em um campo magnético, estes ímãs elementares se orientam paralelamente ao campo (b).

res dos átomos se reforçam e o material passa a apresentar efeitos magnéticos externos apreciáveis. Nestas condições, dizemos que a substância está imantada ou magnetizada, isto é, o material passa a ser um ímã com os pólos norte e sul localizados nas posições indicadas na fig. 23-17-b. Assim, a transformação de um pedaço de ferro comum em um ímã ocorre devido simplesmente à orientação dos ímãs elementares constituídos pelos átomos do pedaço de ferro.

Podemos, agora, entender por que, nas duas situações apresentadas na fig. 23-15, o campo magnético em torno do fio foi alterado pela presença dos meios materiais. De fato, o campo magnético criado pela corrente provoca imantação do meio material. Conseqüentemente, o campo magnético em torno do fio passa a ser uma superposição do campo criado pela corrente com o campo criado pelo material imantado. Como no vácuo (ou no ar) o campo magnético é devido apenas à corrente elétrica, fica entendido por que a presença do meio material modifica o campo magnético em torno do fio.

MATERIAIS PARAMAGNÉTICOS E DIAMAGNÉTICOS

Experiências realizadas pelos cientistas mostraram que a presença de grande parte das substâncias existentes na natureza provoca alteração muito pequena no campo magnético. Isto ocorre porque, ao serem colocadas em um campo magnético, estas substâncias se imantam muito fracamente. Materiais tais como o papel, o cobre, o alumínio, o chumbo etc. se comportam desta maneira, sendo este o motivo pelo qual não conseguimos construir ímãs com estes materiais.

Uma análise mais cuidadosa permitiu verificar que estas substâncias podem ser separadas em dois grupos distintos:

- 1^o) *Substâncias paramagnéticas* — são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, se imantam de maneira a provocar um pequeno *aumento* no valor do campo magnético em um ponto qualquer. Nestas substâncias, os ímãs elementares tendem a se orientar no mesmo sentido do campo aplicado (fig. 23-17-b) e, portanto, o campo magnético estabelecido por elas terá o mesmo sentido deste campo aplicado, fazendo com que o campo resultante tenha um valor um pouco *maior* do que o inicial. O alumínio, o magnésio, a platina, o sulfato de cobre etc. são exemplos conhecidos de substâncias paramagnéticas.
- 2^o) *Substâncias diamagnéticas* — estas substâncias, ao serem colocadas em um campo magnético, têm seus ímãs elementares orientados em sentido *contrário* ao do campo aplicado. Desta maneira, elas estabelecem um campo magnético em sentido contrário ao deste campo aplicado, fazendo com que o campo resultante tenha um valor um pouco *menor* do que o inicial. Podemos citar, como exemplos típicos de substâncias diamagnéticas, o bismuto, o cobre, a água, a prata, o ouro, o chumbo etc.

MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Um pequeno grupo de substâncias na natureza apresenta um comportamento bastante diferente daqueles que acabamos de descrever. Estas substâncias, denominadas substâncias ferromagnéticas, ao serem colocadas em um campo magnético, se imantam fortemente, de modo que o campo magnético que elas estabelecem é muitas vezes maior do que o campo aplicado. Verifica-se que, em

virtude da presença de uma substância ferromagnética, o campo magnético resultante pode se tornar centenas e até mesmo milhares de vezes maior do que o campo magnético inicial.

As substâncias ferromagnéticas são apenas o ferro, o cobalto, o níquel e as ligas que contêm estes elementos. Esta propriedade das substâncias ferromagnéticas é aproveitada quando desejamos obter campos magnéticos de valores elevados. Por exemplo: é comum colocar-se um pedaço de ferro no interior de uma bobina, como está mostrado na fig. 23-18.

Em virtude da imantação deste pedaço de ferro, o campo magnético resultante assim obtido é muitas vezes maior do que o campo criado apenas pela corrente que passa na bobina. Este conjunto (bobina + pedaço de ferro) constitui, então, um eletroímã muito forte, sendo o pedaço de ferro denominado *núcleo do eletroímã*. Os eletroímãs encontram uma série de aplicações na ciência e na tecnologia. Uma dessas aplicações é mostrada na fotografia da fig. 23-19: um guindaste, constituído por um poderoso eletroímã, usado no transporte de cargas muito pesadas.

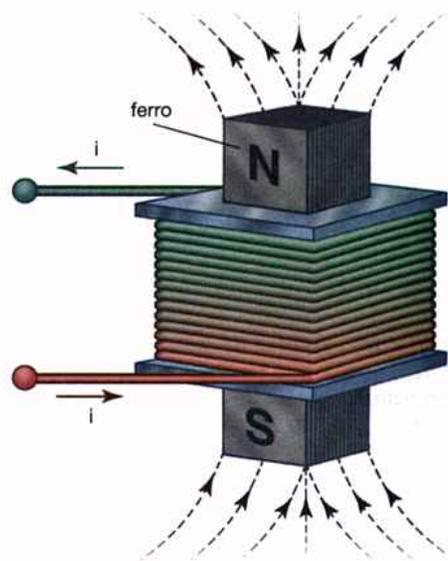
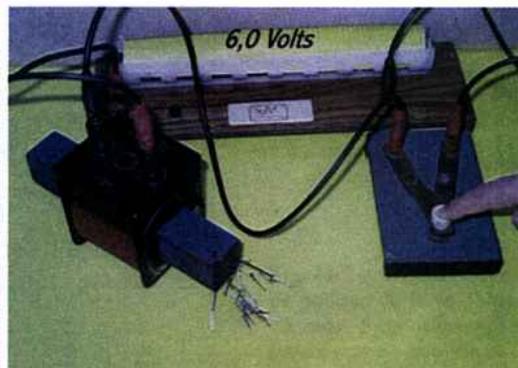


Fig. 23-18: Uma bobina com núcleo de ferro constitui um eletroímã.



Fig. 23-19: Um guindaste de eletroímã pode transportar cargas muito pesadas.



Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPE/FUC-SP

O núcleo de ferro se imanta e torna muito mais intenso o campo magnético nas proximidades da bobina.

Outras aplicações do eletroímã

Em um receptor telefônico, o som que escutamos é produzido de maneira semelhante ao que ocorre em um alto-falante. Como podemos ver na fig. I, a corrente elétrica alternada variável (proveniente do telefone emissor), passando nas espiras de um eletroímã, faz com que uma fina lâmina de ferro seja atraída por ele sucessivas vezes. Como essa lâ-

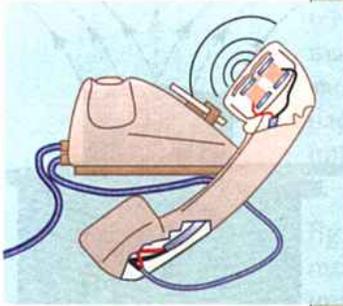


Fig. I: No receptor de um telefone, o som é produzido pelas vibrações de uma lâmina de aço, acionada pelo campo magnético variável de um eletroímã.

mina apresenta uma certa elasticidade, ela tende a voltar à sua posição normal sempre que se interrompe a atração do eletroímã. Por isso, a lâmina vibra rapidamente, dando origem às ondas sonoras no ar, que são transmitidas ao ouvido.

Uma aplicação do eletroímã na **medicina** é mostrada na fig. II. Em hospitais especializados, um poderoso eletroímã costuma ser usado para retirar pequenos pedaços de ferro ou aço que, acidentalmente, tenham atingido o olho de uma pessoa e ofereçam dificuldades para serem retirados por outro processo.



Fig. II: Uma aplicação do eletroímã na medicina.

Não deixe de analisar os problemas 15, 19, 27 e 28 deste capítulo, que também apresentam aplicações interessantes dos eletroímãs.

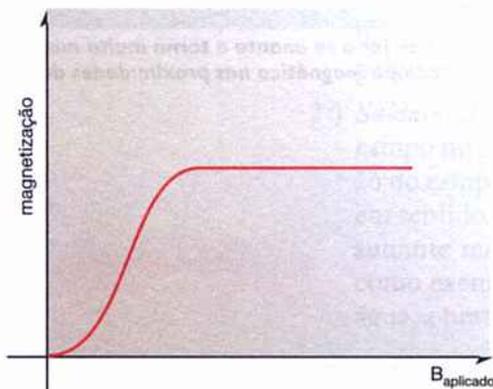


Fig. 23-20: Diagrama mostrando o aumento da magnetização de uma substância ferromagnética como aumento do campo magnético B que provoca este processo.

Como é fácil perceber, o grande aumento que uma substância ferromagnética provoca no campo magnético ao se imantar é devido ao elevado grau de alinhamento que ocorre em seus ímãs elementares. Este alinhamento, isto é, a magnetização da substância, é tanto maior quanto maior for o campo aplicado nela, podendo chegar a uma situação na qual praticamente todos os seus ímãs elementares estão alinhados. Nesta situação, a magnetização da substância atingiu seu valor máximo e, então, a partir daí, ela permanece constante, mesmo que seja aumentado o valor do campo magnético aplicado. Este comportamento de uma substância ferromagnética está ilustrado no gráfico da fig. 23-20.

Observa-se, como poderíamos esperar, que a imantação de um material ferromagnético é tanto menor quanto maior for a sua temperatura. Realmente, como sabemos, a elevação da temperatura do material provoca um aumento na agitação térmica de seus átomos, dificultando, então, o alinhamento dos ímãs elementares por eles constituídos. Portanto, a elevação da temperatura de um material ferromagnético dificulta a sua magnetização.

Podemos, pois, resumir o comportamento magnético das substâncias da seguinte maneira:

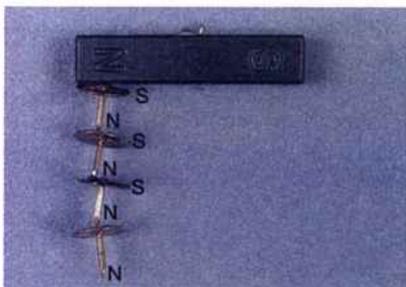
A grande maioria das substâncias na natureza é paramagnética ou diamagnética:
substâncias paramagnéticas — são aquelas que, na presença de um campo magnético, se imantam muito fracamente, fazendo com que o valor do campo magnético seja ligeiramente aumentado.

substâncias diamagnéticas — em presença de um campo magnético se imantam também fracamente, fazendo, porém, com que o valor do campo magnético se torne ligeiramente menor.

O ferro, o cobalto, o níquel e suas ligas são *substâncias ferromagnéticas*: sob a ação de um campo magnético, estas substâncias se imantam fortemente, fazendo com que o campo magnético resultante seja muitas vezes maior do que o campo aplicado.

POR QUE UM ÍMÃ ATRAI UM PEDAÇO DE FERRO

Como você sabe, um pedaço de ferro qualquer (como um prego, por exemplo) é atraído pelos pólos de um ímã. Para entender por que isto ocorre, considere que um pedaço de ferro FG , inicialmente não-imantado, seja colocado próximo ao pólo norte de um ímã, como mostra a fig. 23-21. Como sabemos, o campo magnético do ímã imanta este pedaço de ferro de tal modo que seus ímãs elementares ficam alinhados no sentido do campo aplicado (veja a fig. 23-21). Em outras palavras, o pedaço de ferro se transforma em um ímã, cujos pólos norte e sul estão localizados, respectivamente, nas extremidades F e G . Assim, o pedaço de ferro é atraído pelo pólo norte do ímã porque sua extremidade G , situada mais próxima deste pólo, é um pólo sul.



Por ação do campo magnético do ímã, os pregos situados próximo a seu pólo norte se imantam (seus ímãs elementares se orientam). Então, eles se comportam como ímãs, com os pólos na seqüência indicada, cada um atraindo o seguinte, e permanecendo suspensos na barra magnética.

Agostinho de Paula

Suponha, agora, que uma barra de uma substância diamagnética fosse aproximada do pólo norte do ímã. Neste caso, como já sabemos, a substância se imantaria com seus ímãs elementares orientados em sentido contrário ao do campo aplicado, como mostra a fig. 23-22. Assim, a extremidade G se comportaria como um pólo norte e a barra seria *repelida* pelo ímã. Este fato foi observado pela primeira vez por Faraday, no século XIX. Aproximando uma amostra de bismuto (substância diamagnética) de um dos pólos de um ímã, ele verificou que ela era *repelida* por este pólo, ao contrário do que acontecia com pedaços de ferro (como ele estava acostumado a observar).

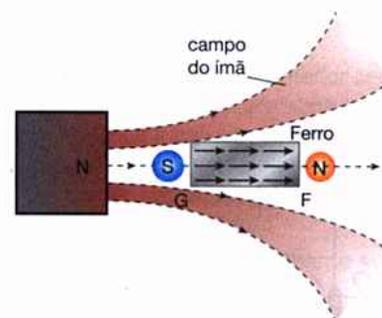


Fig. 23-21: Representação de pedaço de ferro colocado nas proximidades do pólo norte de um ímã.

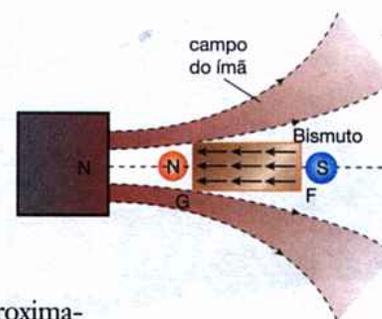


Fig. 23-22: Representação de amostra de bismuto colocada nas proximidades do pólo norte de um ímã.

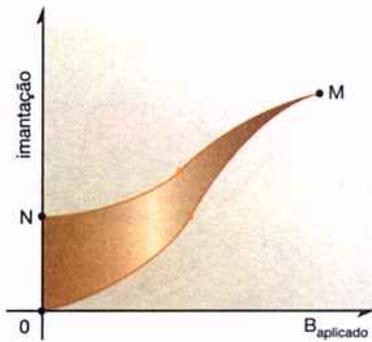


Fig. 23-23: Diagrama ilustrando o fenômeno da histerese em uma substância ferromagnética.

O QUE É HISTERESE MAGNÉTICA

Vimos que uma substância ferromagnética se imanta quando é colocada em um campo magnético. Entretanto, é um fato bastante conhecido que esta substância, ao ser retirada do campo magnético, não se desmagnetiza completamente, isto é, ela apresenta uma certa imantação mesmo na ausência do campo magnético aplicado. Esta propriedade, característica das substâncias ferromagnéticas, é denominada *histerese magnética*.

O gráfico da fig. 23-23 ilustra o fenômeno da histerese. Observe que, ao aumentarmos o valor do campo magnético aplicado ao material, sua imantação aumenta da maneira descrita pela curva *OM*. Em seguida, diminuindo-se o valor do campo aplicado, vemos que a imantação diminui seguindo a curva *MN*. Logo, quando o campo aplicado é reduzido a zero, resta ainda no material ferromagnético uma imantação residual, representada pelo valor *ON*.

Alguns materiais ferromagnéticos, como o aço temperado, conservam uma imantação residual considerável, isto é, apresentam uma histerese muito acentuada. Estas substâncias são, então, usadas na construção de ímãs permanentes. Por outro lado, em certos aparelhos, como, por exemplo, um eletroímã, é necessário que o núcleo de ferro perca praticamente toda sua imantação assim que o campo magnético aplicado desaparecer. Para a confecção do núcleo destes aparelhos é usado um tipo especial de ferro, denominado *ferro doce*, que apresenta uma histerese muito reduzida (praticamente nula).

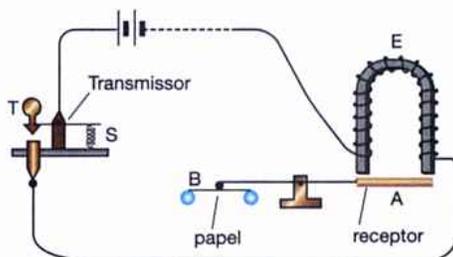


Fig. 23-24: Para o exemplo da secção 23.4.



Os trens convencionais apresentam vibrações muito fortes quando se movimentam com altas velocidades. O trem mostrado na foto (construído na Alemanha) é levitado magneticamente e, por isso, pode deslocar-se a mais de 200 km/h, totalmente livre de vibrações.

Exemplo

A fig. 23-24 é um diagrama de um telégrafo usado para enviar mensagens em código Morse (pontos e traços). Este aparelho é uma aplicação interessante de fenômenos estudados nesta secção, tendo sido inventado no século XIX, nos Estados Unidos, por J. Henry e S. Morse. A seguir, descreveremos o seu funcionamento.

Observe, na figura, que o aparelho consiste essencialmente em duas partes:

- 1º) um circuito elétrico, constituído pelo transmissor das mensagens, ligado em série com uma bateria e um eletroímã;
- 2º) uma pequena alavanca, tendo em uma de suas extremidades uma plaqueta de ferro *A* e, na outra, o dispositivo receptor das mensagens, formado por um estilete *B*, que faz marcas de tinta sobre uma fita de papel que se movimenta sob ele.

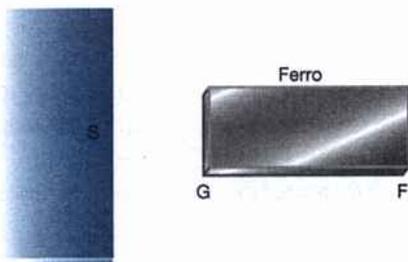
Acionando o interruptor *T*, o circuito elétrico é fechado e uma corrente passará a circular nas espiras do eletroímã *E*. O núcleo de ferro doce deste eletroímã se imanta e atrai a plaqueta *A*. Então, o estilete *B* encosta no papel, marcando-o enquanto o interruptor *T* estiver acionado. Quando deixamos de acionar *T*, a mola *S* faz com que o circuito seja interrompido. Conseqüentemente, o ferro doce do eletroímã perde sua imantação, e a plaqueta *A*, não sendo mais atraída, retorna à sua posição normal de equilíbrio. Evidentemente, nestas condições, o estilete *B* deixará de marcar o papel.

É fácil perceber que, mantendo *T* acionado por um tempo curto ou longo, podemos transmitir uma mensagem de pontos e traços para o receptor. Embora a distância entre o transmissor e o receptor possa ser de vários quilômetros, a transmissão de cada ponto (ou traço) é feita quase que instantaneamente!

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

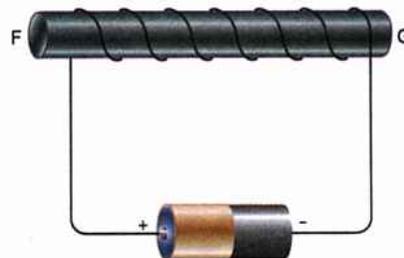
13. Um pedaço de ferro FG é colocado próximo ao pólo sul de um ímã, como mostra a figura deste exercício.
- Trace, em uma cópia da figura, algumas linhas de indução do campo magnético criado pelo ímã.
 - Desenhe alguns ímãs elementares do pedaço de ferro, mostrando sua orientação.
 - Então, a extremidade G do pedaço de ferro será um pólo norte ou um pólo sul?
 - O pedaço de ferro será atraído ou repellido pelo ímã?



Exercício 13.

14. Responda às questões (b), (c) e (d) do exercício anterior, supondo, agora, que a barra FG seja feita de um material diamagnético.

15. Como vimos, podemos obter um eletroímã se enrolarmos um fio condutor em torno de uma barra de ferro e fizermos passar uma corrente contínua no fio. Na figura deste exercício, que apresenta um eletroímã assim obtido, dizer onde se localizam os seus pólos norte e sul.



Exercício 15.

16. Suponha que a barra FG do exercício anterior seja retirada do interior do solenóide e aproximada de um prego comum. Dizer se a barra atrairá ou não o prego nos seguintes casos:
- FG é uma barra de ferro doce.
 - FG é uma barra de aço temperado.
17. Um ímã permanente pode perder totalmente sua imantação se for muito aquecido. Por quê?

um tópico especial para você aprender um pouco mais

23.5. A descoberta do elétron

O fato de ser o elétron uma partícula que possui carga negativa e de ser encontrado na constituição do átomo de qualquer substância, é amplamente divulgado nos dias atuais. Entretanto, a descoberta do elétron é relativamente recente, tendo resultado dos trabalhos desenvolvidos pelo físico inglês J. J. Thomson na última década do século XIX. Estes trabalhos tiveram origem quando aquele cientista se interessou em pesquisar a natureza e as propriedades de certas radiações, conhecidas na época com a denominação de *raios catódicos*. Apresentaremos, a seguir, algumas propriedades destas radiações e mostraremos como o seu estudo levou Thomson à descoberta do elétron.



SPL/Stock Photos

J.J. Thomson (1856-1940)

Físico inglês que revolucionou o estudo da estrutura atômica ao descobrir o elétron. Thomson iniciou seus estudos muito cedo, obtendo uma bolsa de estudos no Trinity College de Cambridge, onde se diplomou em Matemática e onde permaneceu até o fim de sua vida. Dedicando-se às suas pesquisas no Cavendish Laboratory, Thomson teve a felicidade de ter sete dos cientistas que trabalharam sob sua orientação apontados como ganhadores do Prêmio Nobel. Ele próprio recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1906 por suas pesquisas sobre a condução elétrica dos gases, que o levaram à descoberta do elétron.

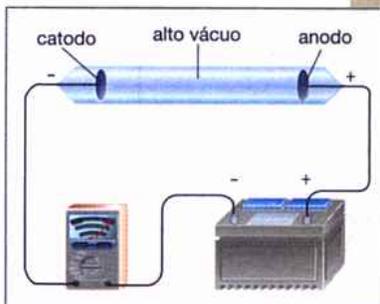


Fig. 23-25: Diagrama de tubo de raios catódicos.

A DESCOBERTA DOS RAIOS CATÓDICOS

No século XIX, vários físicos desenvolveram experiências para estudar a condução de eletricidade através dos gases. Estas experiências eram geralmente realizadas utilizando-se um tubo de vidro, nas extremidades do qual eram adaptadas duas placas metálicas, como mostra a fig. 23-25. Uma alta voltagem era aplicada a estas placas, sendo denominada *catodo* a placa de potencial mais baixo (ligada ao pólo negativo) e *anodo* a placa de potencial mais elevado (ligada ao pólo positivo). A corrente elétrica que passava através do gás existente no tubo era indicada pelo amperímetro mostrado na figura.

Procurando estudar a passagem de corrente à medida que o gás no tubo ia sendo rarefeito, os cientistas verificaram um fato inesperado: mesmo quando um alto vácuo era alcançado, o amperímetro continuava a indicar a passagem de corrente através do tubo (apesar de praticamente não existir um meio material entre o catodo e o anodo).



Hulton/Getty Images

William Crookes (1832-1919).

Físico e químico inglês, notável por seus trabalhos com os raios catódicos e pela descoberta do elemento tálio. Tendo herdado uma grande fortuna de seus pais, montou seu próprio laboratório de pesquisas, passando a se dedicar inteiramente à ciência. Em suas pesquisas com raios catódicos, Crookes inventou vários dispositivos para estudar o comportamento destas radiações, mas sua teoria sobre a natureza dos raios mostrou-se incorreta sob vários aspectos. Durante os estudos que o levaram à descoberta do tálio, ele construiu o *radiômetro de Crookes*, dispositivo capaz de converter a radiação luminosa em movimento rotatório, que foi utilizado no desenvolvimento de aparelhos de medida de precisão.

Para estudar este fenômeno, Sir W. Crookes construiu, em 1875, um tubo curvo, como aquele mostrado na fig. 23-26. Fazendo o vácuo no tubo e aplicando uma diferença de potencial entre o catodo e o anodo, Crookes observou que a região do tubo oposta ao catodo (região R na fig. 23-26) apresentava uma luminescência esverdeada. Ele suspeitou que esta luminescência fosse causada por algum tipo de radiação que era emitida pelo catodo e, deslocando-se em li-

nha reta, atingia o vidro do tubo em *R*. Estas radiações, cuja natureza Crookes não conseguiu determinar, foram denominadas *raios catódicos* (em virtude de serem emitidas pelo catodo).

PROPRIEDADES DOS RAIOS CATÓDICOS

Para comprovar que os raios catódicos realmente se propagavam em linha reta, Crookes realizou uma experiência que se tornou muito conhecida e que está ilustrada na fig. 23-27. Colocando um obstáculo com a forma de uma cruz em frente ao catodo, ele verificou que uma sombra deste obstáculo se projetava na parede de vidro, no meio da região luminescente. Como este comportamento é muito semelhante ao das radiações luminosas quando formam a sombra de um objeto, vários cientistas passaram a suspeitar que os raios catódicos fossem um tipo de onda invisível, porém da mesma natureza que a luz.

Entretanto, outras experiências realizadas também por Crookes mostraram que os raios catódicos são desviados por um campo magnético. De fato, ao aproximar um ímã de um tubo como aquele mostrado na fig. 23-27, ele verificou que a sombra (e a luminescência) se deslocava sobre a parede de vidro. Como as ondas luminosas não são desviadas por um campo magnético, este resultado fez com que alguns cientistas levantassem a hipótese de que os raios catódicos poderiam ser constituídos de partículas eletrizadas (estas, como já se sabia naquela época, são desviadas pela ação de um campo magnético). Observando o sentido do desvio dos raios catódicos, os cientistas concluíram que tais partículas eram eletrizadas negativamente.

AS EXPERIÊNCIAS DE J. J. THOMSON

Durante cerca de 25 anos, nada de novo surgiu que permitisse decidir definitivamente entre as duas hipóteses: os raios catódicos seriam um tipo de onda semelhante à luz ou um feixe de partículas eletrizadas negativamente?

Somente em 1897 as experiências realizadas por J. J. Thomson esclareceram que os raios catódicos eram realmente constituídos por partículas que possuíam carga negativa. A principal evidência a favor desta conclusão foi o fato de Thomson ter conseguido verificar que os raios catódicos eram também desviados pela ação de um campo elétrico. Estas partículas foram, mais tarde, denominadas *elétrons*.

Uma vez conhecida a natureza dos raios catódicos, Thomson procurou determinar algumas propriedades das partículas que constituem estes raios, isto é, algumas propriedades dos elétrons. Seria importante medir, por exemplo, o valor da carga q e da massa m destas partículas. Não foi possível, entretanto, obter experimentalmente os valores destas grandezas. O que Thomson conseguiu foi medir a razão entre a carga e a massa, isto é, o quociente q/m para o elétron.

A fotografia da fig. 23-28 mostra o tubo de raios catódicos (semelhante a um tubo de TV) que foi usado por Thomson para efetuar esta medida. Não vamos nos preocupar em descrever a experiência que ele realizou, porque atualmente existem montagens que nos permitem chegar ao

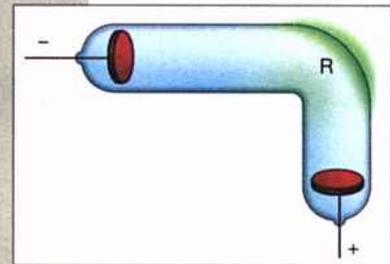


Fig. 23-26: Representação de tubo de Crookes, apresentando luminescência esverdeada na região *R*.

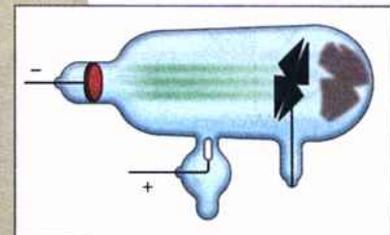


Fig. 23-27: Esquema da experiência de Crookes para mostrar a propagação retilínea dos raios catódicos.

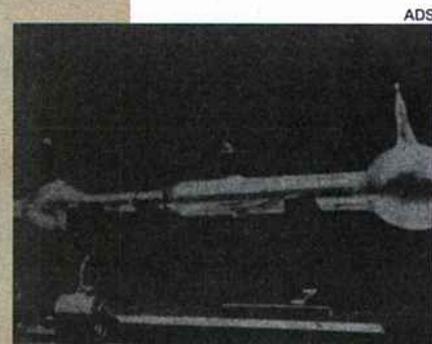


Fig. 23-28: Tubo de raios catódicos usado por Thomson em suas experiências para a determinação de q/m para o elétron.

mesmo resultado com procedimentos muito mais simples. Analisaremos, a seguir, um destes métodos mais modernos, que pode ser reproduzido até mesmo em laboratórios de ensino da Física.

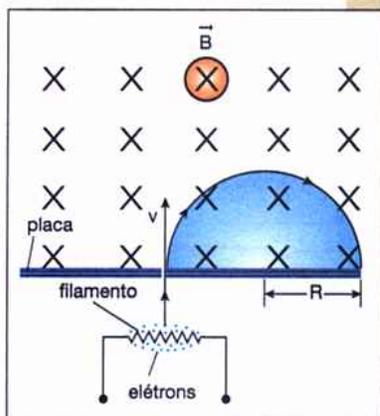


Fig. 23-29: Esquema da válvula usada nos laboratórios de ensino para a medição de q/m para o elétron.



Fig. 23-30: Fotografia da válvula esquematizada na fig. 23-29.

UMA EXPERIÊNCIA SIMPLES QUE PERMITE OBTER A RAZÃO CARGA/MASSA DO ELÉTRON

Na fig. 23-29 apresentamos o esquema de uma montagem que nos permite medir facilmente a razão q/m para um feixe de elétrons emitidos por um filamento aquecido. Os elétrons, emitidos pelo filamento em virtude do efeito termoiônico (analisado no Tópico Especial do capítulo 21), são acelerados em direção a uma placa por uma voltagem V aplicada entre esta placa e o filamento. Os elétrons passam, então, através de um orifício da placa e penetram em uma região onde existe um campo magnético uniforme \vec{B} . Sob a ação deste campo, o feixe de elétrons descreve uma semicircunferência, como mostra a fig. 23-29.

O raio R deste movimento circular pode ser facilmente determinado na experiência, porque os elétrons, ao atingirem a placa, provocam uma luminescência no ponto de impacto. Este conjunto é envolvido por um invólucro de vidro, constituindo uma válvula, que é colocada entre duas bobinas criando o campo magnético (veja a fotografia da fig. 23-30).

O raio R da trajetória circular que uma partícula eletrizada descreve em um campo magnético é, como sabemos, dado por

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad \text{donde} \quad \frac{q}{m} = \frac{v}{BR}$$

Então, para determinarmos a razão q/m do elétron, devemos conhecer os valores de v , B e R . O valor de R é medido diretamente no aparelho e o valor de B pode ser calculado se conhecermos a corrente que passa nas bobinas. Para determinar v , basta lembrar que o trabalho realizado sobre o elétron, entre o filamento e a placa, é igual a qV . Graças a este trabalho, o elétron adquire uma energia cinética dada por $(1/2)mv^2$. Assim:

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \quad \text{donde} \quad v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

Substituindo este valor de v na expressão de q/m , obtemos:

$$\frac{q}{m} = \frac{2V}{B^2 R^2}$$

Como o valor de V pode ser obtido facilmente com o voltímetro, esta expressão nos permite determinar a razão q/m para o elétron. Em uma experiência realizada com este dispositivo, foram obtidos os seguintes valores:

$$V = 320 \text{ V} \quad B = 1,2 \times 10^{-3} \text{ T} \quad R = 5,0 \text{ cm}$$

Substituindo estes valores na expressão de q/m , obtém-se

$$\frac{q}{m} = 1,76 \times 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

O ELÉTRON ESTÁ PRESENTE NO ÁTOMO DE QUALQUER SUBSTÂNCIA

Em suas experiências, Thomson encontrou resultados muito próximos deste que é obtido com montagens mais modernas. Repetindo a experiência com catodos feitos de diferentes materiais, ele obteve sempre o mesmo valor para o quociente q/m , concluindo, então, que todos os materiais emitem a mesma espécie de partículas. Em outras palavras, Thomson chegou à conclusão de que todas as substâncias possuem elétrons em sua constituição. Tendo percebido que a massa de um elétron é muito pequena (apesar de não ter conseguido obter o seu valor), ele lançou a hipótese de que o átomo não seria indivisível, como se pensava até então. De acordo com sua hipótese, o átomo deveria ser constituído de partículas ainda menores, sendo o elétron uma destas partículas.

Alguns anos mais tarde, como vimos no Tópico Especial do capítulo 19, R. Millikan conseguiu determinar experimentalmente a carga do elétron em suas famosas experiências com gotas de óleo. De posse deste valor ($q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) e usando o resultado obtido por Thomson ($q/m = 1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$), foi possível a Millikan calcular o valor da massa do elétron. Sendo

$$\frac{q}{m} = 1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg} \quad \text{e} \quad q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

ele obteve

$$m = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}} \quad \text{donde} \quad m = 0,91 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

Ficaram assim determinadas tanto a carga quanto a massa do elétron, uma das partículas fundamentais da constituição da matéria.

As experiências de J. J. Thomson, que o levaram a descobrir que os raios catódicos são constituídos de partículas negativas — os elétrons — e lhe permitiram medir a razão q/m destas partículas, foram de extrema importância para o desenvolvimento da Física Moderna. Por este motivo, ele recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1906.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

18. Considere que, no interior do tubo de vidro mostrado na fig. 23-25, há um gás no qual foi estabelecida uma corrente elétrica (vimos, no capítulo 20, que esta corrente é constituída pelo movimento de íons positivos, negativos ou elétrons livres).
 - a) Os íons positivos no tubo estarão se deslocando do anodo para o catodo ou em sentido contrário?
 - b) E os elétrons livres?
19. a) Qual a origem da denominação raios catódicos, usada por Sir W. Crookes?
 - b) Na fig. 23-26, se as posições dos eletrodos (catodo e anodo) fossem invertidas, onde seria observada a luminescência esverdeada?
20. Quais as duas hipóteses, apresentadas inicialmente pelos cientistas, sobre a natureza dos raios catódicos?
21. a) Na fig. 23-26, suponha que um ímã, em forma de barra, fosse aproximado do tubo, perpendicularmente ao plano da página, com o pólo norte voltado para o tubo. Para onde se deslocaria a região luminescente R?

- b) Por que os cientistas descartaram a hipótese de que os raios catódicos pudessem ter a mesma natureza da luz (sendo, porém, invisíveis)?
22. Em suas experiências, Thomson conseguiu obter dados que lhe permitiram caracterizar as partículas constituintes dos raios catódicos. Qual o valor que ele conseguiu medir (a massa de cada partícula, sua carga ou outro valor)?
23. Considere as seguintes partículas atômicas: elétron, próton, nêutron, partícula α (núcleo do átomo de hélio) e pósitron (é a antipartícula do elétron, possuindo a mesma massa e carga positiva de mesmo módulo que ele). Se você calculasse o valor absoluto da razão carga/massa ($|q/m|$) para cada uma dessas partículas:
- Quais delas teriam o mesmo valor de $|q/m|$?
 - Qual(is) partícula(s) apresenta(m) o maior valor de $|q/m|$?
 - Qual partícula apresenta o menor valor (não nulo) de $|q/m|$?
 - Para qual partícula o valor de $|q/m|$ é nulo?
24. Suponha que fosse possível, na válvula esquematizada na fig. 23-29 (e apresentada na fig. 23-30), substituir o filamento por uma fonte emissora de prótons, com o objetivo de medir a razão carga/massa desta partícula, mantendo os mesmos valores da voltagem V e do campo magnético \vec{B} . Considerando a massa do próton aproximadamente 1600 vezes maior do que a do elétron:
- Quantas vezes maior, aproximadamente, seria o raio R da trajetória que o próton iria descrever?
 - Seria possível realizar esta experiência, nestas condições, usando a válvula mencionada?
25. Thomson chegou à conclusão de que as partículas constituintes dos raios catódicos eram sempre do mesmo tipo, qualquer que fosse o material usado na confecção do catodo. Por quê?
26. Explique como foi possível, alguns anos após as experiências de Thomson, obter o valor da massa do elétron.

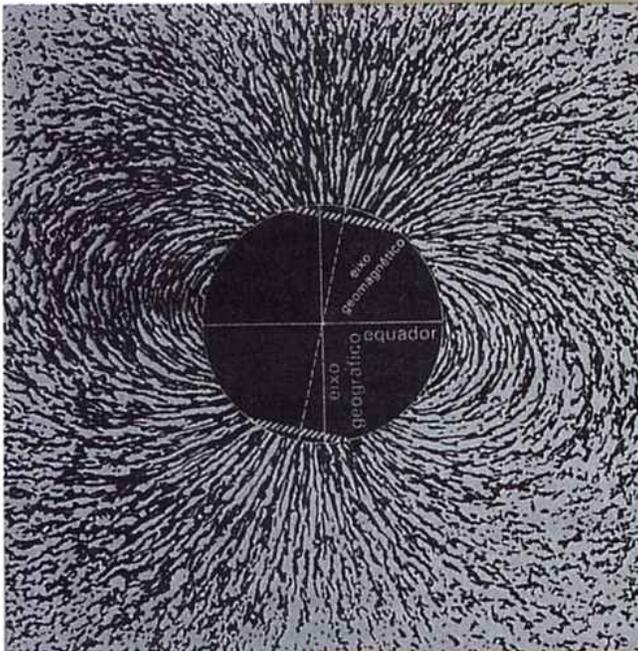


Fig. 1: Modelo do campo magnético da Terra, estabelecido por uma esfera magnetizada. As linhas do campo magnético estão representadas por limalhas de ferro.

O campo magnético terrestre

Como já dissemos no capítulo anterior, a Terra se comporta como um grande ímã, estabelecendo um campo magnético no espaço em torno dela. Na fig. 1 está representado um modelo da Terra (esfera magnetizada) e de seu campo magnético (concretizado por limalhas de ferro). O eixo geomagnético, que liga os pólos norte e sul magnéticos, não coincide com o eixo geográfico da Terra, isto é, com seu eixo de rotação (veja a fig. 1). O ângulo formado por esses eixos é de aproximadamente 13° e, assim, o pólo sul magnético está situado a cerca de 1 300 km do pólo norte geográfico, em um ponto ao norte da baía de Hudson, no Canadá (como você deve se lembrar, o pólo magnético da Terra que está situado próximo ao pólo norte geográfico é um pólo sul magnético).

Durante muito tempo, os cientistas acreditaram que o campo magnético da Terra era criado por enormes porções de minerais de ferro magnetizado, existentes no interior do nosso planeta e distribuídas de maneira a criar o grande ímã-Terra.

Atualmente, sabe-se que esta hipótese não pode ser verdadeira, porque toda a matéria existente no interior da Terra está em temperatura tão elevada que o ferro e o níquel ali presentes estão no estado líquido. Nestas condições, é impossível orientar os ímãs elementares dessas substâncias,

que se mantêm em uma distribuição caótica, não dando origem, portanto, a nenhum efeito magnético externo.

Não há, até a presente data, nenhuma explicação completa e detalhada da origem do campo magnético terrestre. A teoria mais aceita é a de que este campo seja criado por enormes correntes elétricas, circulando na parte líquida do interior da Terra, que é altamente condutora. Tal teoria explica satisfatoriamente as principais características do campo terrestre, e também de campos magnéticos existentes em outros planetas, como Mercúrio e Júpiter. Entretanto, a fonte de energia necessária para criar e manter essas correntes é ainda desconhecida, constituindo um tema de pesquisa e interesse permanente. O que há de mais enigmático sobre o campo magnético de nosso planeta são as várias inversões de polaridade que ele já experimentou: observações geológicas permitiram concluir que seu sentido foi invertido cerca de 170 vezes nos últimos 17 milhões de anos, ou seja, os pólos sul e norte magnéticos trocam de posição, em média, a cada 100 000 anos! Para este fato, também ainda não foi possível encontrar uma explicação adequada.

AURORA BOREAL E AURORA AUSTRAL

Provavelmente você já ouviu falar destes belos espetáculos de luz e cores, que podem ser observados na atmosfera, nas proximidades dos pólos norte e sul da Terra (fig. II).

Os termos *aurora boreal* e *aurora austral* significam, respectivamente, “luzes do norte” e “luzes do sul”. Estes fenômenos são conhecidos desde a Antiguidade, sendo mencionados na mitologia dos esquimós e de outros povos, que lhes atribuíam origem sobrenatural. Podem apresentar-se com variadas formas (cortinas, arcos, raios etc.) e cores.



Michael Glanecchini/Photo Researchers/Stock Photos

Fig. II: A aurora boreal e a austral são fenômenos atmosféricos que constituem um belo espetáculo de luz e de cores.

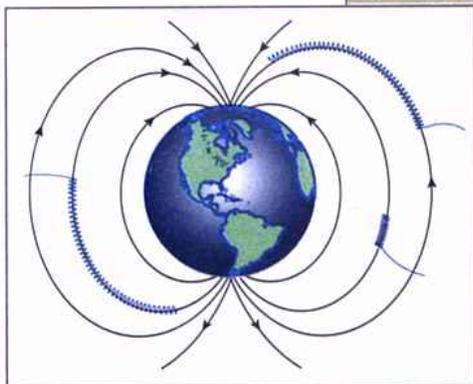


Fig. III: Ilustração esquemática. Partículas eletrizadas, provenientes do Sol, são "capturadas" pelo campo magnético da Terra.

A causa das auroras está relacionada com o campo magnético da Terra e uma explicação bem elaborada deste fenômeno só foi possível após o lançamento dos primeiros satélites artificiais. Instrumentos de observação, colocados nesses satélites, permitiram concluir que feixes de partículas eletrizadas (elétrons e prótons), emitidas pelo Sol, são capturados pelo campo magnético terrestre ao passarem nas proximidades da Terra e descrevem trajetórias espiraladas neste campo, como mostra a fig. III (no Problema Suplementar 1 do capítulo anterior analisa-se este tipo de trajetória). As extensas regiões em torno da Terra, nas quais estas partículas descrevem as trajetórias espiraladas, são denominadas *cinturões de Van Allen* em homenagem ao cientista americano que verificou a existência de tais regiões. Grande número dessas partículas são defletidas em direção aos pólos magnéticos da Terra (onde o campo magnético é mais intenso). Ao atingirem a atmosfera, as partículas colidem principalmente com os átomos e moléculas de oxigênio e nitrogênio, fazendo com que eles emitam a luz que constitui a aurora. O fenômeno é, pois, semelhante ao que ocorre em um tubo de TV no qual, como vimos, elétrons acelerados provocam emissão de luz ao colidirem com as substâncias da tela.

isã reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Como são as linhas de indução do campo magnético criado pela corrente que passa em um condutor reto e comprido? Faça um desenho ilustrando sua resposta.
 - Descreva a regra de Ampère, que nos permite determinar o sentido do campo magnético em torno do fio.
- Seja B o módulo do campo magnético criado por uma corrente i , que passa em um fio reto e comprido, em um ponto situado a uma distância r deste fio.
 - Qual é a relação entre B e i ?
 - Qual é a relação entre B e r ?
 - Expresse matematicamente estas relações.
- Qual é a direção do vetor \vec{B} criado no centro de uma espira circular por uma corrente que passa nesta espira?
 - Explique como podemos determinar o sentido do vetor \vec{B} , usando a regra de Ampère.
- Seja B o módulo do campo magnético no centro de uma espira circular de raio R , criado por uma corrente i que passa nesta espira.
 - Qual é a relação entre B e i ?
 - Qual é a relação entre B e R ?
 - Expresse matematicamente estas relações.
- O que é um solenóide (ou bobina)? Faça um desenho para ilustrar sua resposta.
 - Suponha uma corrente passando no solenóide que você desenhou. Trace algumas linhas de indução do campo magnético criado por esta corrente em pontos interiores e exteriores ao solenóide.
 - Indique qual é a extremidade do eletroímã assim obtido que se comporta como um pólo norte.
- Seja B o módulo do campo magnético criado no interior de um solenóide percorrido por uma corrente i que apresenta n espiras por unidade de comprimento.
 - Qual é a relação entre B e i ?
 - Qual é a relação entre B e n ?
 - Expresse matematicamente estas relações.

7. a) Explique o que se entende por ímã elementar em um material.
b) Faça um desenho mostrando como os ímãs elementares estão distribuídos em uma substância não-ímantada.
c) Mostre, em um desenho, como estão dispostos os ímãs elementares de uma substância magnetizada.
8. Explique por que o campo magnético no espaço em torno de um fio, percorrido por uma corrente, se altera quando este fio é envolvido por um meio material.
9. Explique resumidamente o que é e dê exemplos de:
 - a) Uma substância paramagnética.
 - b) Uma substância diamagnética.
 - c) Uma substância ferromagnética.
10. a) Considere uma barra de ferro colocada próxima a um dos pólos de um ímã. Explique por que ela é atraída pelo ímã.
b) Se esta barra fosse feita de um material diamagnético, ela seria atraída ou repelida pelo ímã? Por quê?
11. a) Explique o que se entende por histerese magnética.
b) Analise a fig. 23-23 e descreva com suas palavras a experiência representada no gráfico daquela figura.
12. a) Dê um exemplo de substância que apresente histerese acentuada e cite uma aplicação prática desta substância.
b) Faça o mesmo para uma substância que praticamente não apresenta histerese.

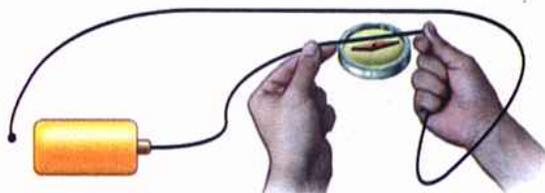
algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

Nesta experiência você repetirá as observações feitas por Oersted sobre o desvio de uma agulha magnética quando colocada nas proximidades de uma corrente elétrica. Para fazer previsões sobre o sentido do desvio da agulha, você vai usar a regra de Ampère que foi apresentada neste capítulo.

- 1º) Disponha um fio sobre uma bússola, paralelamente à agulha magnética, e ligue uma de suas extremidades a um dos pólos de uma pilha (veja a figura desta experiência).
- 2º) Suponha que a extremidade livre do fio fosse encostada no outro pólo da pilha (não faça isto por enquanto). Nestas condições, responda:
 - a) Qual seria o sentido do campo magnético, criado pela corrente no fio, no local onde se encontra a bússola (use a regra de Ampère)?
 - b) Então, para qual lado desviará o pólo norte da agulha se você fechar o circuito? Feche o circuito e verifique se sua previsão estava correta.
- 3º) Inverta o sentido da corrente e repita os procedimentos indicados anteriormente. O desvio da agulha está de acordo com sua previsão?



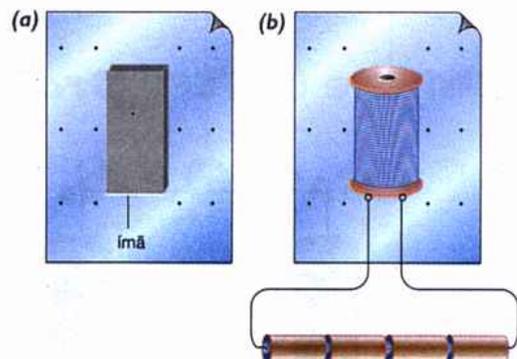
Primeira experiência.

- 4º) Faça o mesmo colocando a bússola, agora, sobre o fio. A agulha desviou no sentido que você havia previsto?

Segunda experiência

Para comparar o campo magnético de um ímã em forma de barra com o campo criado por uma bobina (solenóide), você poderá proceder da seguinte maneira:

- 1º) Coloque o ímã sobre uma folha de papel e marque, nesta folha, alguns pontos situados aproximadamente nas posições indicadas na figura (a) desta experiência. Ponha uma pequena bússola sucessivamente em cada um destes pontos. Observando a orientação da agulha magnética, desenhe o vetor \vec{B} criado pelo ímã nos pontos indicados.



Segunda experiência.

- 2º) Tome uma bobina com cerca de 100 (ou mais) espiras, ligada a uma bateria de pilhas secas (três ou quatro pilhas). Disponha esta bobina sobre uma

folha de papel e marque, nesta folha, alguns pontos, de maneira semelhante ao que foi feito para o ímã (veja a figura (b) desta experiência). Com o auxílio da pequena bússola, desenhe o vetor \vec{B} criado pelo solenóide em cada um destes pontos.

Compare as direções e os sentidos dos vetores \vec{B} obtidos nas duas partes desta experiência. Os campos magnéticos criados por um solenóide e por um ímã em forma de barra são realmente semelhantes, como foi afirmado na secção 23.3?

Terceira experiência

Podemos verificar se uma substância é ferromagnética aproximando dela o pólo de um ímã. Como vimos neste capítulo, se a substância for ferromagnética ela se imantará fortemente e será atraída pelo ímã. Por outro lado, se a substância for paramagnética, ou diamagnética, sua imantação será tão fraca que a força de atração ou repulsão que o ímã exerce sobre ela não será percebida.

Aproxime um ímã de vários objetos existentes à sua volta: um pedaço de papel, um objeto de plástico, um pedaço de madeira, uma colher, um recipiente de alumínio, a maçaneta de uma porta, um fio de cobre, objetos metálicos de decoração etc. Baseando-se em suas observações:

- Indique, entre os objetos observados, aqueles que são ferromagnéticos.
- Cite quais os metais (ou ligas) testados que não são ferromagnéticos.

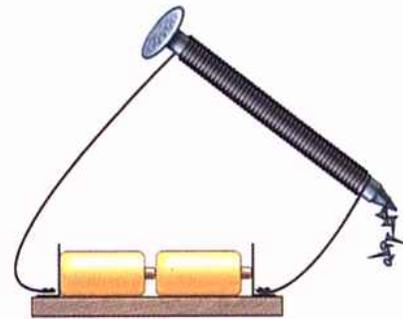
Quarta experiência

- Enrole um fio fino (capeado ou esmaltado) em torno de um prego grande, de ferro, de modo a formar uma bobina com cerca de 50 espiras. Ligue as extremidades do fio aos pólos de uma ou duas pilhas, como mostra a figura desta experiência.

Desta maneira, você terá construído um eletroímã com núcleo de ferro.

- Aproxime uma das extremidades do eletroímã, que você construiu, de pequenos objetos de ferro ou aço (preguinhos, alfinetes, cliques etc.). Observe a atração do prego imantado sobre estes pequenos objetos. Desligue a corrente que passa no eletroímã e descreva o que ocorre com esta atração.
- Repita a experiência substituindo o prego de ferro (núcleo do eletroímã) por um objeto de aço (chave de fenda, tesoura etc.) que não esteja previamente imantado.

Tendo em vista o que ocorre em cada um dos casos quando você desliga a corrente no eletroímã, responda: qual dos dois materiais (ferro ou aço) apresenta uma histerese mais acentuada?



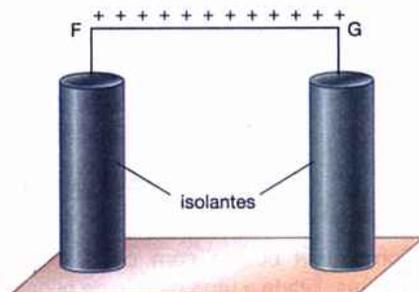
Quarta experiência.

Quinta experiência

No exemplo resolvido no final da secção 23.4 foi analisado o funcionamento de um telégrafo Morse muito simples, apresentado na fig. 23-31. Orientando-se pela descrição feita e pela figura correspondente, procure construir um telégrafo como aquele. Você poderá usá-lo para enviar mensagens em código Morse a um colega situado a vários metros de distância.

problemas e testes problemas e testes problemas

1.

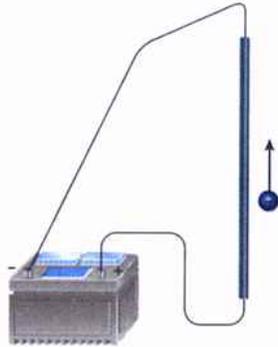


Problema 1.

Um fio metálico FG tem suas extremidades presas a dois suportes isolantes, como mostra a figura deste problema. O fio está eletrizado uniformemente com uma carga positiva. Este fio estabelecerá no espaço em torno dele:

- Um campo elétrico?
 - Um campo magnético?
- Um elétron é lançado com uma velocidade v paralelamente a um fio reto e comprido ligado a uma bateria (veja a figura deste problema).

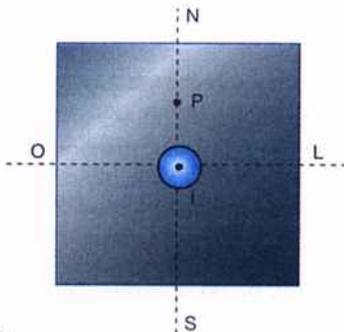
- a) Qual será a direção e o sentido da força magnética que atuará no elétron?
- b) Responda à questão anterior, supondo, agora, que o elétron fosse lançado penetrando na folha de papel.



Problema 2.

3. A figura deste problema representa o chão de uma sala, na qual estão indicadas as direções norte-sul e leste-oeste. Um fio reto é colocado verticalmente nesta sala, conduzindo uma corrente i dirigida para cima. Suponha que uma pequena agulha magnética seja colocada no ponto P indicado na figura. Diga qual orientação que a agulha tomará nos seguintes casos:

- a) A intensidade da corrente no fio é muito elevada.
- b) O campo magnético da corrente tem um valor aproximadamente igual ao campo magnético terrestre.



Problema 3.

4. Na tabela deste problema, B representa o módulo do campo magnético em um ponto, criado pela corrente que passa em um fio retilíneo, e r é a distância deste ponto ao fio.

- a) Copie a tabela em seu caderno e complete-a.
- b) Com os valores da tabela, construa o gráfico $B \times r$.
- c) Como se denomina (na Matemática) a curva que você obteve?

r (cm)	B (T)
1,0	$6,0 \times 10^{-5}$
2,0	
3,0	
4,0	
5,0	

Problema 4.

5. Dois fios retilíneos, (1) e (2), percorridos pelas correntes i_1 e i_2 , são perpendiculares à folha de papel, como está mostrado em corte na figura deste problema. O campo magnético no ponto P só poderá ser nulo se i_1 e i_2 forem tais que:

- a) $i_1 = i_2$ e tiverem sentidos opostos.
- b) $i_1 > i_2$ e tiverem ambos o mesmo sentido.
- c) $i_1 > i_2$ e tiverem sentidos opostos.
- d) $i_1 < i_2$ e tiverem ambos o mesmo sentido.
- e) $i_1 < i_2$ e tiverem sentidos opostos.

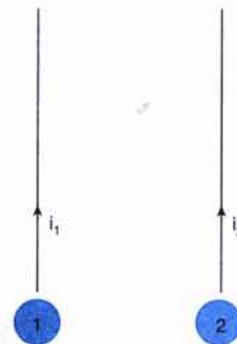


Problema 5.

6. No problema anterior, assinale a opção que poderia resultar em um campo magnético nulo no ponto Q .

7. Dois fios retos e paralelos, (1) e (2), são percorridos pelas correntes i_1 e i_2 , de mesmo sentido, como mostra a figura deste problema.

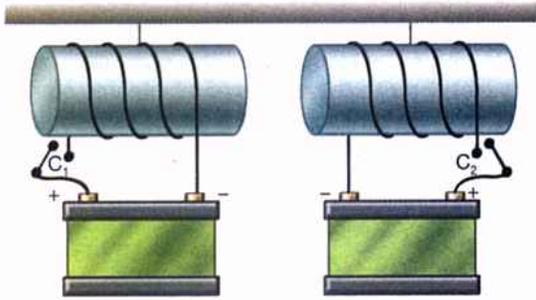
- a) Desenhe, em uma cópia da figura, o campo magnético \vec{B}_1 que a corrente i_1 cria nos pontos onde está situado o fio (2).
- b) Desenhe o campo magnético \vec{B}_2 que a corrente i_2 cria nos pontos onde está situado o fio (1).
- c) Qual é o sentido da força que o campo \vec{B}_1 exerce sobre o fio (2)?
- d) Qual é o sentido da força que o campo \vec{B}_2 exerce sobre o fio (1)?
- e) Então, quando dois condutores paralelos são percorridos por correntes de mesmo sentido, eles se atraem ou se repelem?



Problema 7.

8. Suponha que, no problema anterior, a corrente i_2 tenha sentido contrário àquele mostrado na figura. Nestas condições, responda às questões (a), (b), (c) e (d) formuladas naquele problema.
- e) Então, quando dois condutores paralelos são percorridos por correntes de sentidos contrários, eles se atraem ou se repelem?

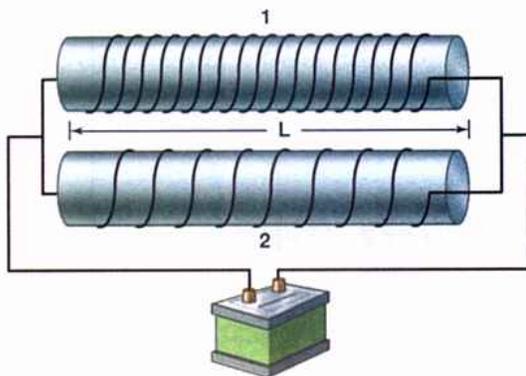
9. Ao fecharmos as chaves C_1 e C_2 , mostradas na figura deste problema, os eletroímãs irão se atrair ou se repelir?



Problema 9.

10. Duas bobinas, (1) e (2), de mesmo diâmetro e de mesmo comprimento L , são feitas com um mesmo tipo de fio e estão ligadas a uma bateria, como mostra a figura deste problema. O número de espiras na bobina (1) é o dobro do número de espiras da bobina (2). Analise as alternativas seguintes e assinale aquelas que são *corretas*:

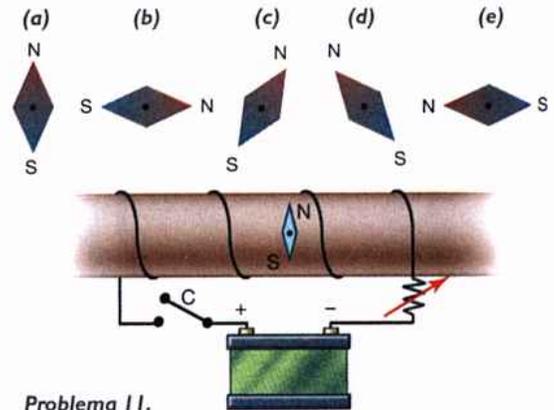
- As duas bobinas estão submetidas à mesma voltagem.
- A resistência elétrica da bobina (1) é duas vezes maior do que a da bobina (2).
- A corrente elétrica da bobina (1) é duas vezes menor do que a corrente da bobina (2).
- O número de espiras, por unidade de comprimento, da bobina (1) é duas vezes maior do que o da bobina (2).
- O valor do campo magnético no interior da bobina (1) é igual ao valor do campo no interior da bobina (2).



Problema 10.

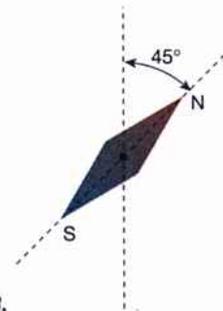
11. A figura deste problema mostra uma pequena agulha magnética colocada no interior de um solenóide. Com a chave C desligada, a agulha toma a orientação indicada na figura. Fechando-se a chave C e ajustando-se o reostato, obtemos, no interior do solenóide, um campo magnético muito maior do que o campo magnético terrestre.

Nestas condições, indique, entre as alternativas seguintes, aquela que melhor representa a orientação final da agulha magnética:



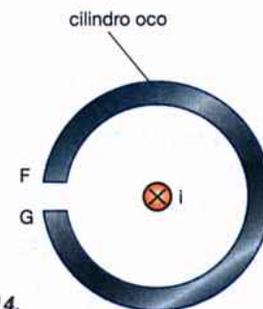
Problema 11.

12. Resolva o problema anterior, supondo, agora, que o reostato tenha sido ajustado de tal modo que o campo magnético da Terra não seja desprezível em relação ao campo magnético do solenóide.



Problema 13.

13. Na figura do problema 11, suponha que a corrente no solenóide tenha sido ajustada, por meio do reostato, até que a agulha magnética tenha se desviado de 45° a partir de sua posição inicial (veja a figura deste problema). Nesta situação, sabe-se que o campo magnético do solenóide vale $B = 2,7 \times 10^{-5} \text{ T}$. Então, qual é o valor do campo magnético da Terra, \vec{B}_T , no local da experiência?

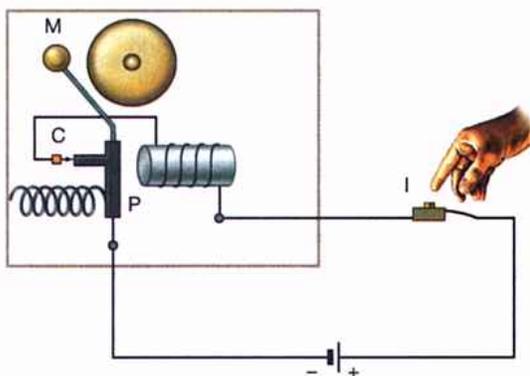


Problema 14.

14. Considere um cilindro oco, de ferro, apresentando uma fenda, como aquele mostrado em corte na figura deste problema. Um condutor retilíneo, conduzindo uma corrente i que penetra na folha de papel, é colocado ao longo do eixo do cilindro (veja a

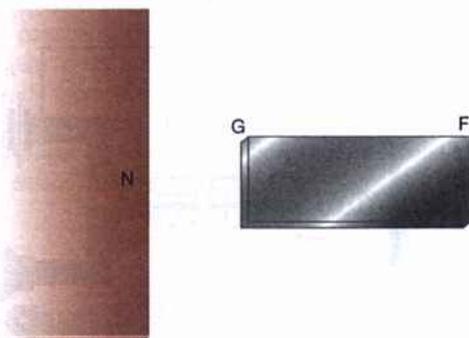
figura). O campo magnético da corrente provocará a imantação do cilindro, e as faces *F* e *G* da fenda se comportarão como os pólos de um ímã. Diga qual dessas faces é o pólo norte e qual é o pólo sul.

15. O circuito de uma campainha de corrente contínua está mostrado esquematicamente na figura deste problema. Neste circuito, *P* é uma plaqueta de ferro e *C* é um contato que abre ou fecha o circuito quando *P* se encosta ou se afasta dele. Acompanhando a corrente fornecida pela bateria, explique como funciona esta campainha elétrica.



Problema 15.

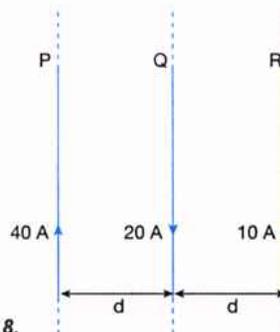
16. Em uma região onde o campo magnético da Terra é horizontal, é colocado um fio, também horizontal, conduzindo uma corrente de oeste para leste. Verifica-se que em certos pontos, próximos ao fio, o campo magnético é nulo. Onde estão situados estes pontos?
17. Quando a face do pólo de um ímã é muito grande, verifica-se que o campo magnético próximo a este pólo é praticamente uniforme. Suponha que o pólo norte mostrado na figura deste problema satisfaça esta condição. Se um pedaço de ferro *FG* for colocado próximo a este pólo (veja a figura):
- FG* se imantará?
 - FG* será atraído pelo pólo do ímã? Explique.



Problema 17.

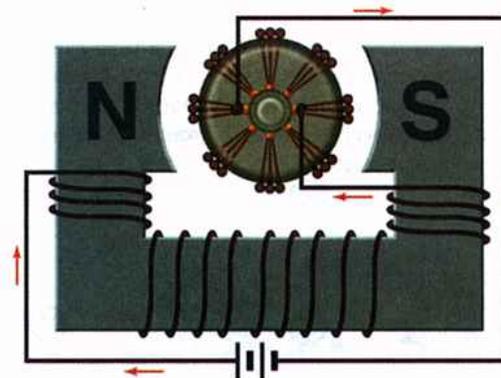
18. *P*, *Q* e *R* são fios retilíneos, longos e paralelos, conduzindo as correntes indicadas na figura deste pro-

blema. Qual é o módulo, a direção e o sentido da resultante das forças magnéticas que *P* e *Q* exercem sobre *R*?



Problema 18.

19. Nos motores elétricos, em geral, o campo magnético é produzido por eletroímãs. A figura deste problema mostra um motor em série, isto é, um motor no qual o circuito das espiras que entram em rotação está em série com a bobina do eletroímã. Invertendo-se a polaridade da bateria que alimenta o motor, o que acontecerá com seu sentido de rotação?



Problema 19.

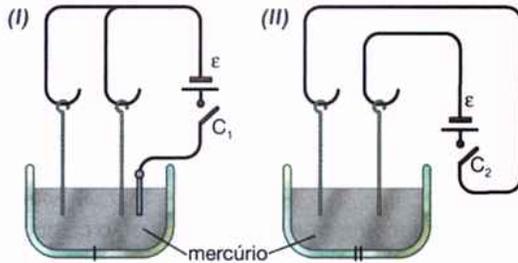
20. No problema 18 sabe-se que a corrente de 20 A, em *Q*, estabelece na posição onde está o fio *R* um campo magnético cujo módulo é $8,0 \times 10^{-5}$ T. Supondo que o sentido da corrente do fio *P* fosse invertido, determine o módulo, a direção e o sentido da força magnética resultante que atua em um comprimento igual a 20 cm do fio *R*.
21. A figura deste problema mostra três fios paralelos retos e longos, dispostos perpendicularmente ao plano do papel, cada um deles percorrido por uma corrente *i*, nos sentidos indicados na figura. Cada fio, separadamente, cria em um ponto a 20 cm de distância dele um campo magnético igual a $5,0 \times 10^{-5}$ T. Determine o módulo do campo magnético resultante, criado pelos três fios, no ponto *P*.



Problema 21.

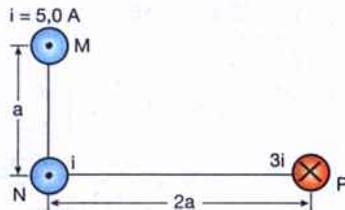
22. As figs. I e II deste problema representam circuitos elétricos nos quais existem fios suspensos, cujas extremidades estão mergulhadas em mercúrio. Sabendo-se que os fios suspensos podem mover-se livremente, dizer o que ocorrerá com esses fios quando as chaves C_1 e C_2 forem fechadas:

- a) Para o caso da fig. I.
- b) Para o caso da fig. II.



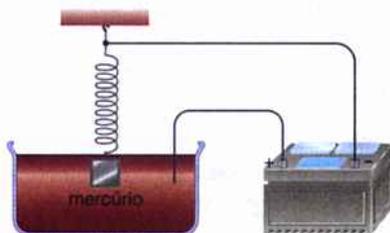
Problema 22.

23. Três fios, M , N e P , retos e compridos, paralelos entre si, estão dispostos perpendicularmente ao plano da figura deste problema, nas posições ali mostradas. O valor e o sentido da corrente em cada fio estão também indicados na figura. Sabendo-se que o campo magnético que o fio M cria na posição onde está colocado o fio N vale $2,0 \times 10^{-5}$ T, calcule a força por unidade de comprimento que atua em N , devida às correntes em M e P .



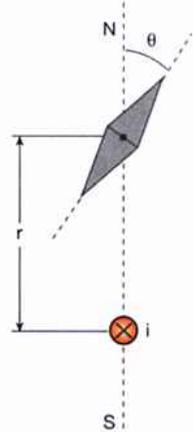
Problema 23.

24. Uma mola metálica é suspensa verticalmente, estando distendida por um pequeno peso também metálico que, nestas condições, está em contato com a superfície do mercúrio contido em um recipiente (veja a figura deste problema). Ligando-se a mola em uma bateria, da maneira mostrada na figura, verifica-se que ela passa a oscilar verticalmente, com o peso abrindo e fechando o circuito através do mercúrio. Explique por que isto acontece. Sugestão: Observe o sentido da corrente em duas espiras adjacentes e lembre-se da solução do problema 7 deste capítulo.



Problema 24.

25. A figura deste problema representa um fio reto e comprido, percorrido por uma corrente i , com o sentido indicado. A uma distância r do fio, ao longo da direção norte-sul, coloca-se uma pequena agulha magnética, observando-se que ela forma um ângulo θ com esta direção.



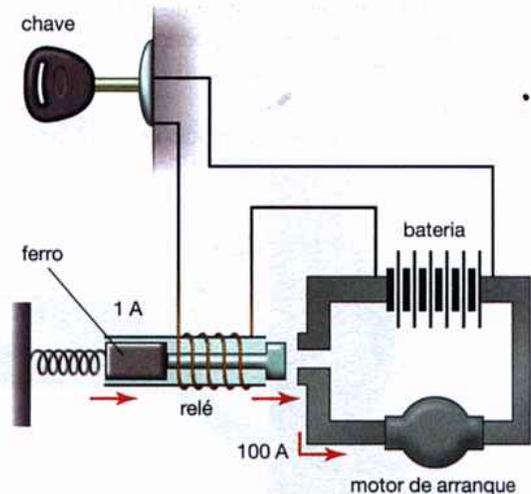
Problema 25.

- a) À medida que aumentamos a distância r , o valor de θ aumenta, diminui ou não se altera?
- b) Um estudante, realizando esta experiência, mediu diversos valores de θ , correspondentes a diferentes valores de r . Como se denomina (na Matemática) a curva que ele obteve ao traçar o gráfico $\text{tg } \theta \times r$?

26. Em um automóvel, o funcionamento do motor de arranque exige uma corrente de grande intensidade (100 A, ou mais), que deve, então, ser transportada por fios grossos e curtos (pequena resistência). Por este motivo, para ligar este motor, utiliza-se um outro circuito (de fios mais finos e longos), que é percorrido por corrente de pequena intensidade e faz funcionar uma chave magnética, denominada relé.

A figura deste problema mostra o circuito de um motor de arranque e do relé usado para acioná-lo (quando o motorista gira a chave do carro, para dar a partida do motor).

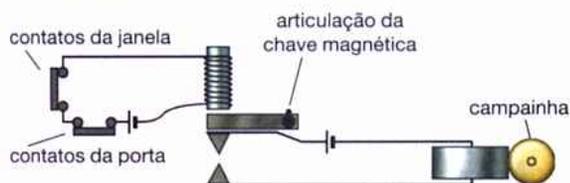
- a) Os dois circuitos mencionados estão ligados em série ou em paralelo à bateria?
- b) Observando a figura, explique como funciona o relé para ligar e desligar o motor de arranque.



Problema 26.

27. O diagrama do circuito de um alarme contra ladrão, próprio para residências, é apresentado na figura

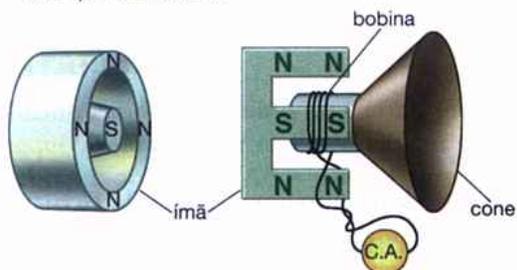
deste problema. Examine os circuitos mostrados no diagrama e explique como funciona este tipo de alarme.



Problema 27.

28. A figura deste problema apresenta o esquema de um alto-falante que, como você deve saber, é usado em rádios, TVs e aparelhos de som, em geral, para produzir uma onda sonora a partir de oscilações elétricas. Em síntese, ele é constituído de um ímã permanente fixo e de um cone de papelão que pode oscilar ao longo de seu próprio eixo. Em torno da base do cone, e presa a ela, há uma bobina que é alimentada por uma corrente elétrica variável (de acordo com o som que se deseja reproduzir).

- Descreva o que acontece com o cone de papelão quando uma corrente alternada (C.A.) é estabelecida na bobina. Explique por que isto acontece.
- A onda gerada pelo cone é transversal ou longitudinal?
- A frequência do som produzido é maior, menor ou igual à frequência da corrente da bobina?
- Ao se variar a intensidade média da corrente na bobina, qual a característica da onda sonora emitida que é alterada?



Problema 28.

29. Uma pessoa, tentando construir um eletroímã, enrolou um fio em torno de um núcleo de ferro em forma de U, de modo a obter várias espiras em cada ramo do U, da maneira mostrada na figura deste problema. Ao ligar as extremidades do fio a uma bateria (em bom estado), observou que o campo magnético obtido

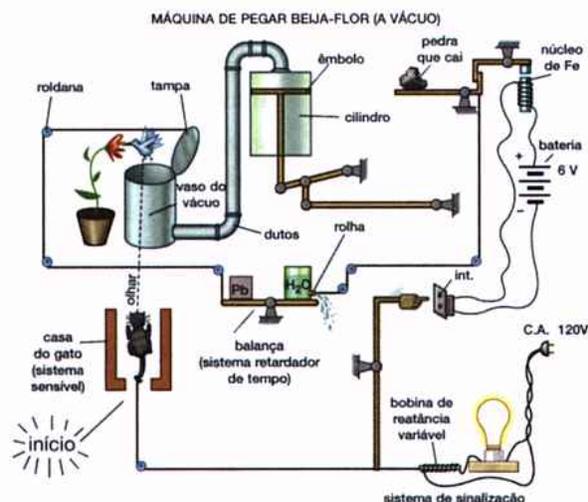
era praticamente nulo. Observando com atenção a figura, procure explicar por que a pessoa não obteve êxito em sua experiência.



Problema 29.

30. A figura deste problema mostra o esquema de uma "máquina de pegar beija-flor (a vácuo)", projetada por G. Ricci, quando estudante da Escola de Engenharia da UFMG, e publicado no jornal dos alunos dessa escola. Após analisar o esquema:

- Identifique um dispositivo, presente nesta máquina, que você estudou neste capítulo.
- Procure explicar qual a função da bobina de reatância variável, usada no projeto da máquina (consulte textos didáticos, seu professor ou um técnico em eletricidade).
- Descreva, com detalhes, o funcionamento da máquina, destacando cada aspecto físico que aparece em seu projeto.



Problema 30.

ular questões de vestibular questões de vestibula

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

apêndice E

E.1. A lei de Biot-Savart

Ao longo deste capítulo, analisamos os campos magnéticos criados por condutores de corrente elétrica, em algumas situações particulares, e afirmamos que é possível, por meio de experiências, estabelecer as seguintes relações para os módulos desses campos magnéticos:

$$\text{campo de um condutor retilíneo: } B \propto \frac{i}{r}$$

$$\text{campo no centro de uma espira circular: } B \propto \frac{i}{R}$$

$$\text{campo de um solenóide: } B \propto ni$$

Nesta secção, vamos determinar as expressões matemáticas que fornecem os módulos desses campos, a partir de uma lei geral do Eletromagnetismo, que a maioria dos autores de textos de Física denomina *lei de Biot-Savart*, em homenagem aos cientistas franceses Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Felix Savart (1791-1841). Essa lei foi proposta por eles e seus resultados foram experimentalmente comprovados pouco tempo depois de os referidos cientistas tomarem conhecimento da experiência de Oersted (que analisamos no capítulo anterior).

A LEI DE BIOT-SAVART

A fig. E-1 está representando um circuito elétrico, percorrido por uma corrente i , fornecida por uma bateria. Fixemos nossa atenção em um trecho muito pequeno do circuito, de comprimento $\Delta\ell$, isto é, um elemento $\Delta\ell$ do circuito. O elemento $\Delta\ell$ estabelece em um ponto P , situado a uma distância r de $\Delta\ell$, um campo magnético $\Delta\vec{B}$ de pequena intensidade (ou um campo elementar $\Delta\vec{B}$). A direção e o sentido do vetor $\Delta\vec{B}$ podem ser obtidos por meio da regra de Ampère que estudamos na secção 23.1. Você pode usar essa regra para verificar que, na fig. E-1, o vetor $\Delta\vec{B}$, no ponto P , está entrando na folha de papel, conforme está mostrado. (Se a corrente tivesse sentido contrário ao mostrado na fig. E-1, o vetor $\Delta\vec{B}$ estaria saindo da folha.)

Para determinar o módulo de $\Delta\vec{B}$, os cientistas estudaram os campos magnéticos criados por condutores de diversas formas e concluíram que:

1º) ΔB é proporcional à intensidade da corrente i , que passa pelo elemento $\Delta\ell$: $\Delta B \propto i$.

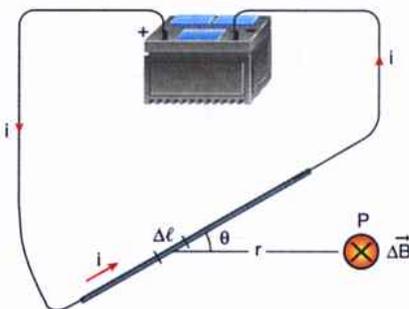


Fig. E-1: O elemento $\Delta\ell$, do circuito, percorrido por uma corrente i , cria um campo elementar $\Delta\vec{B}$, em P .

2º) ΔB depende do comprimento $\Delta \ell$ e do ângulo θ formado pelo elemento com o segmento que une esse elemento ao ponto P (veja a fig. E-1), chegando à seguinte relação: $\Delta B \propto \Delta \ell \sin \theta$.

3º) ΔB é inversamente proporcional ao quadrado da distância r , entre $\Delta \ell$ e P :

$$\Delta B \propto \frac{1}{r^2}$$

Associando esses resultados em uma única relação, temos:

$$\Delta B \propto \frac{i \Delta \ell \sin \theta}{r^2}$$

Como sabemos, uma relação de proporcionalidade pode ser transformada numa igualdade pela introdução de uma constante apropriada. Considerando o circuito da fig. E-1 no vácuo (ou no ar), isto é, sem a influência de meios materiais, vamos designar por C_0 a constante correspondente a essa situação. Teremos, então:

$$\Delta B = C_0 \frac{i \Delta \ell \sin \theta}{r^2}$$

Essa expressão, que fornece o módulo do campo magnético criado por um elemento da corrente, é a expressão matemática da lei de Biot-Savart, de grande importância no estudo do Eletromagnetismo, pois a partir dela é possível calcular o campo magnético estabelecido por condutores diversos (fio retilíneo, solenóide etc.). Efetuamos esse cálculo aplicando a lei de Biot-Savart a cada elemento que constitui o condutor e adicionando vetorialmente os resultados, para obter o campo estabelecido pelo condutor como um todo, conforme veremos na seção seguinte.

COMENTÁRIOS

- 1) Conforme vimos, o módulo do campo magnético, criado em um ponto por um pequeno elemento, é inversamente proporcional ao quadrado da distância do elemento ao ponto ($\Delta B \propto 1/r^2$). É interessante observar que esse tipo de dependência é válido também, como já estudamos, para o campo elétrico (criado por uma carga puntual) e para o campo gravitacional (criado por uma massa puntual).
- 2) Devemos destacar que ΔB depende do ângulo θ mostrado na fig. E-1. Pela lei de Biot-Savart você pode ver que, se $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$, temos $\sin \theta = 0$ e, portanto, $\Delta B = 0$. Então, o elemento $\Delta \ell$ não cria campo magnético em pontos situados sobre sua reta suporte (fig. E-2). Para um dado valor de r , o maior valor de ΔB ocorrerá quando $\theta = 90^\circ$, ou seja, para pontos tais que o segmento r seja perpendicular a $\Delta \ell$, como está indicado na fig. E-2.
- 3) Já dissemos que a constante C_0 que aparece na equação $\Delta B = C_0 i \Delta \ell \sin \theta / r^2$ se refere à situação em que o condutor que cria o campo magnético está situado no vácuo (ou no ar). Nesse caso, o valor da constante C_0 , no S.I., é

$$C_0 = 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

Na presença de meios materiais, já sabemos que o módulo do campo

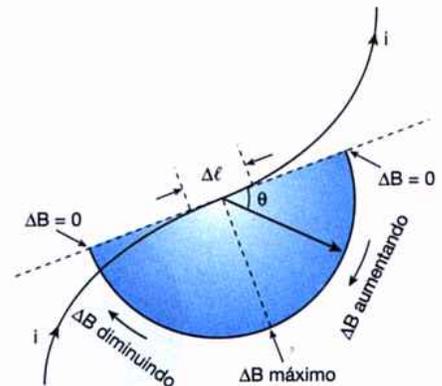


Fig. E-2: ΔB depende do ângulo θ .

magnético se modifica e a constante C_0 é substituída por uma constante C , cujo valor depende do meio no qual o condutor está mergulhado.

- 4) Com o objetivo de simplificar algumas equações do Eletromagnetismo, costuma-se introduzir uma constante μ_0 , denominada *permeabilidade do vácuo*, cujo valor é:

$$\mu_0 = 4\pi C_0 \quad \text{ou} \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

Portanto, $C_0 = \mu_0/4\pi$ e a lei de Biot-Savart, quando se usa essa nova constante, toma a seguinte forma:

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \Delta \ell \sin \theta}{r^2}$$

Evidentemente, na presença de um meio material, a constante μ_0 deverá ser substituída por uma constante μ , denominada *permeabilidade do meio*.

No nível deste curso, é indiferente trabalhar com a lei de Biot-Savart usando a constante C_0 ($\Delta B = C_0 i \Delta \ell \sin \theta / r^2$) ou a constante μ_0 [$\Delta B = (\mu_0/4\pi) i \Delta \ell \sin \theta / r^2$].

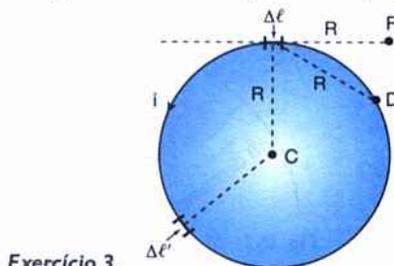
EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto sempre que julgar necessário**.

- A partir da expressão matemática da lei de Biot-Savart, determine, no S.I., a unidade da constante C_0 (lembre-se que no S.I. a unidade de ΔB é $1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$).
 - Determine também, no S.I., a unidade da permeabilidade μ_0 .
- Medindo-se a permeabilidade magnética μ de três meios materiais M , N e P , encontrou-se:
 - meio M : μ um pouco menor do que μ_0
 - meio N : μ um pouco maior do que μ_0
 - meio P : μ muito maior do que μ_0

Cada um dos meios M , N e P é paramagnético, diamagnético ou ferromagnético? Explique.

3.



Exercício 3.

Uma espira circular, de raio $R = 10 \text{ cm}$, situada no ar, é percorrida por uma corrente $i = 5,0 \text{ A}$. Considere o elemento $\Delta \ell = 1,0 \text{ mm}$ dessa espira e o ponto F situado a uma distância R de $\Delta \ell$, como mostra a figura deste exercício. Qual o valor do campo magnético $\Delta \vec{B}$ que $\Delta \ell$ estabelece em F ?

- Considerando a situação descrita no exercício anterior, determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético que $\Delta \ell$ estabelece no centro C da espira.
- Considerando, ainda, a situação do exercício 3, determine o módulo do campo magnético $\Delta \vec{B}$ que $\Delta \ell$ estabelece no ponto D mostrado na figura do exercício.
- Na figura do exercício 3, tomemos outro elemento da espira $\Delta \ell' = 0,80 \text{ mm}$.
 - Qual o módulo, a direção e o sentido do campo $\Delta \vec{B}'$ que $\Delta \ell'$ estabelece no centro C da espira?
 - Qual é o módulo do campo magnético que $\Delta \ell$ e $\Delta \ell'$, em conjunto, estabelecem no centro da espira?

E.2. Aplicações da lei de Biot-Savart

CAMPO MAGNÉTICO NO CENTRO DE UMA ESPIRA CIRCULAR

Consideremos uma espira circular, de raio R , percorrida por uma corrente i , como a da fig. E-3. Na secção 23.2, vimos que o módulo do campo magnético \vec{B} , criado pela corrente i no centro da espira, é tal que $B \propto i/R$. Vamos agora, usando a lei de Biot-Savart, obter a expressão matemática que fornece o módulo de \vec{B} . Tomando um elemento $\Delta\ell$ qualquer da espira, observando o sentido da corrente e usando a regra de Ampère, vemos que esse elemento cria, no centro da espira, um campo magnético $\Delta\vec{B}$ entrando no plano da fig. E-3. Além disso, a figura nos mostra que $\theta = 90^\circ$ ($\text{sen } \theta = 1$) e que $r = R$. Assim, a lei de Biot-Savart nos fornece:

$$\Delta B = C_0 \frac{i\Delta\ell}{R^2}$$

Qualquer outro elemento $\Delta\ell$ da espira cria, no seu centro, um campo magnético $\Delta\vec{B}$ que tem a mesma direção e o mesmo sentido daquele elemento considerado (mostrado na fig. E-3). Portanto, para obtermos o campo magnético \vec{B} , criado por toda a espira em seu centro, devemos somar algebricamente os módulos dos vetores $\Delta\vec{B}$, pois são vetores de mesma direção e sentido.

Realizando essa soma, obtemos:

$$B = \Sigma\Delta B \quad \text{ou} \quad B = \Sigma C_0 \frac{i\Delta\ell}{R^2}$$

Observando que para todos os elementos $\Delta\ell$ da espira os valores de C_0 , i e R são os mesmos, podemos colocá-los em evidência na soma anterior, isto é:

$$B = \frac{C_0 i}{R^2} \Sigma\Delta\ell$$

É claro que $\Sigma\Delta\ell$ representa o comprimento total da espira, ou seja:

$$\Sigma\Delta\ell = 2\pi R$$

Então

$$B = \frac{C_0 i}{R^2} \cdot 2\pi R \quad \text{donde} \quad \boxed{B = 2\pi C_0 \frac{i}{R}}$$

Essa é a expressão procurada. Observe que ela está de acordo com aquilo que foi visto na secção 23.2, isto é, temos $B \propto i/R$.

Se desejarmos trabalhar com a constante μ_0 , em lugar de C_0 , basta lembrar que $C_0 = \mu_0/4\pi$. Logo,

$$B = 2\pi \cdot \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \cdot \frac{i}{R} \quad \text{donde} \quad \boxed{B = \frac{\mu_0 i}{2R}}$$

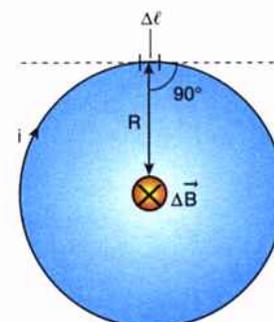


Fig. E-3: Para o cálculo do campo magnético no centro de uma espira circular, percorrida por uma corrente i .

CAMPO MAGNÉTICO DE UM CONDUTOR RETILÍNEO

Na fig. E-4 está representado um fio reto, muito comprido, percorrido por uma corrente i , com o sentido indicado. Já vimos, na secção 23.1, que essa corrente estabelece em um ponto P , a uma distância r do fio, um campo magnético tal que $B \propto i/r$.

De maneira semelhante ao que fizemos para uma espira circular, vamos usar a lei de Biot-Savart para calcular o módulo desse campo magnético. Para isso, consideremos o elemento $\Delta\ell$ mostrado na fig. E-4. Esse elemento estabelece em P um campo elementar $\Delta\vec{B}$ penetrando no plano da fig. E-4 (verifique isso usando a regra de Ampère). Como sabemos, o módulo de $\Delta\vec{B}$ é fornecido pela lei de Biot-Savart:

$$\Delta B = C_0 \frac{i\Delta\ell \sin\theta}{x^2}$$

onde x é a distância de $\Delta\ell$ a P e o ângulo θ está mostrado na fig. E-4. É fácil verificar que qualquer outro elemento $\Delta\ell$ do fio comprido estabelecerá, em P , um campo $\Delta\vec{B}$ que também estará penetrando no plano da fig. E-4, cujo módulo é dado pela expressão anterior. Portanto, para determinar o módulo \vec{B} do campo magnético criado em P pelo condutor como um todo, teremos que *somar algebricamente* os módulos dos vetores elementares $\Delta\vec{B}$, pois eles são vetores de mesma direção e sentido. Logo,

$$B = \Sigma \Delta B \quad \text{ou} \quad B = \Sigma C_0 \frac{i\Delta\ell \sin\theta}{x^2}$$

Nessa expressão, apenas C_0 e i são constantes, pois, ao passarmos de um elemento do fio a outro, tanto x quanto θ se alteram. Então,

$$B = C_0 i \Sigma \frac{\Delta\ell \sin\theta}{x^2}$$

A soma indicada nessa relação só tem condições de ser calculada por meio de Cálculo Integral, cujo estudo é desenvolvido somente em cursos superiores. Por essa razão, não vamos apresentar o seu desenvolvimento e nos limitaremos a informar o resultado da operação. Usando o Cálculo Integral (em que os elementos $\Delta\ell$ são considerados infinitesimais) e supondo o fio condutor muito comprido, obtemos:

$$\Sigma \frac{\Delta\ell \sin\theta}{x^2} = \frac{2}{r}$$

portanto, temos

$$B = C_0 i \left(\frac{2}{r} \right) \quad \text{ou} \quad B = 2C_0 \frac{i}{r}$$

Vemos, assim, que a aplicação da lei de Biot-Savart nos leva à conclusão de que, para um fio reto e comprido, temos $B \propto i/r$, conforme foi informado na secção 23.1.

A expressão anterior tomará a seguinte forma, se usarmos a constante μ_0 :

$$B = 2 \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \frac{i}{r} \quad \text{ou} \quad B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

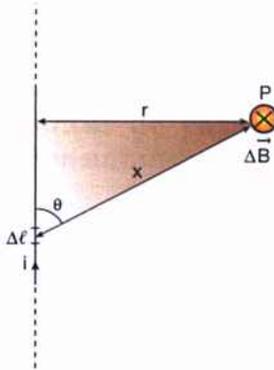


Fig. E-4: Para o cálculo do campo magnético criado por um fio reto e comprido, percorrido por uma corrente i .

CAMPO MAGNÉTICO DE UM SOLENÓIDE

Na secção 23.3 vimos que, no interior de um solenóide percorrido por uma corrente i , existe um campo magnético praticamente uniforme e tal que $B \propto ni$, onde n é o número de espiras por unidade de comprimento do solenóide. A expressão matemática que fornece o módulo desse campo magnético também pode ser obtida a partir da lei de Biot-Savart. Entretanto, o cálculo dessa expressão é bastante complexo, não havendo condições de desenvolvê-lo em um curso de ensino médio. Portanto, apresentaremos apenas o resultado obtido quando esses cálculos são desenvolvidos. Temos, no interior do solenóide:

$$B = 4\pi C_0 ni$$

ou, trabalhando com μ_0 :

$$B = 4\pi \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) ni \quad \text{ou} \quad B = \mu_0 ni$$

Observe que, nessa expressão, temos $B \propto ni$, como já havíamos afirmado.

Exemplo

Uma espira circular, de raio R , construída com um fio fino, situada no ar, é percorrida por uma corrente i . Perpendicular ao plano da espira e encostado nela (mas eletricamente isolado) temos um condutor retilíneo comprido, também bastante fino e percorrido por uma corrente i , penetrando no plano do desenho, como mostra a fig. E-5-a. Determine o módulo do campo magnético resultante, estabelecido no centro C da espira, pelos dois condutores.

A corrente na espira cria, em C , um campo magnético \vec{B}_1 que, pela regra de Ampère, está penetrando na folha de papel (fig. E-5-b) e cujo módulo, como vimos nesta secção, é:

$$B_1 = \frac{\mu_0 i}{2R}$$

O campo \vec{B}_2 , que o condutor retilíneo estabelece em C , tem a direção e o sentido mostrados na fig. E-5-b (obtidos pela regra de Ampère). Observando que, sendo os fios muito finos, a distância do condutor ao centro C é R , temos:

$$B_2 = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$$

Como \vec{B}_1 e \vec{B}_2 são vetores perpendiculares, o módulo do campo resultante \vec{B} , no ponto C , será dado por:

$$B^2 = B_1^2 + B_2^2$$

$$\text{ou} \quad B^2 = \frac{\mu_0^2 i^2}{4R^2} + \frac{\mu_0^2 i^2}{4\pi^2 R^2}$$

$$\text{donde} \quad B^2 = \frac{\mu_0^2 i^2}{4R^2} \left(1 + \frac{1}{\pi^2} \right)$$

$$\text{ou} \quad B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \sqrt{1 + \pi^2}$$

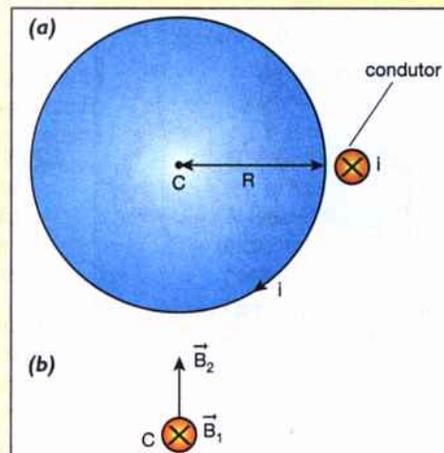


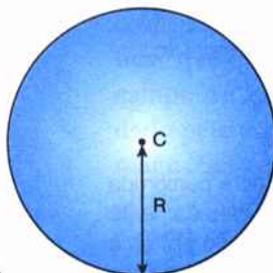
Fig. E-5: Para o exemplo resolvido nesta secção.

exercícios de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

7. A espira circular, de raio $R = 10$ cm, situada no ar, mostrada na figura deste exercício, é percorrida por uma corrente i . Sabendo-se que essa corrente estabelece no centro da espira um campo magnético $B = 3,14 \times 10^{-5}$ T saindo do plano da figura:

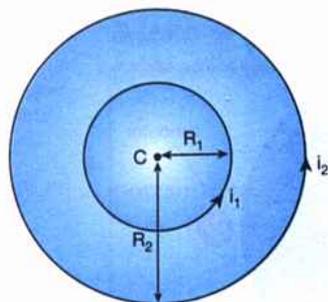
- Indique, em uma cópia da figura, o sentido da corrente na espira.
- Determine a intensidade dessa corrente.



Exercício 7.

8. A figura deste exercício mostra duas espiras circulares coplanares, no ar, de mesmo centro C , e de raios $R_1 = 10$ cm e $R_2 = 15$ cm. As espiras são percorridas pelas correntes $i_1 = 5,0$ A e $i_2 = 3,0$ A com os sentidos indicados na figura. Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético estabelecido em C :

- Pela corrente i_1 .
- Pela corrente i_2 .
- Por ambas as correntes (campo resultante).

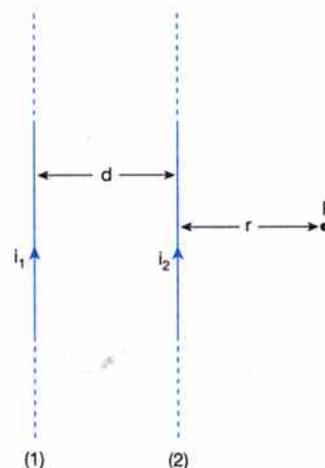


Exercício 8.

- No exercício anterior, deseja-se alterar a corrente i_2 de tal modo que o campo magnético resultante no ponto C seja nulo. Para que isso ocorra, qual deve ser a intensidade e o sentido da corrente i_2 ?
- Um fio reto e comprido, no ar, é percorrido por uma corrente i de mesma intensidade que aquela

que percorre a espira circular do exercício 7. Considere um ponto P a uma distância r do fio igual ao raio R daquela espira. Seja \vec{B}_c o campo no centro da espira referida e \vec{B}_p o campo em P criado pelo fio.

- Comparando as equações que fornecem \vec{B}_c e \vec{B}_p , diga qual desses campos tem maior módulo.
 - Calcule o valor de \vec{B}_p .
11. Dois fios retos e compridos, no ar, paralelos entre si, são percorridos pelas correntes $i_1 = 10,0$ A e $i_2 = 2,0$ A, com os sentidos mostrados na figura deste exercício. Os fios estão separados pela distância $d = 30$ cm e o ponto P está a uma distância $r = 10$ cm do fio (2). Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético estabelecido em P :
- Pela corrente i_1 .
 - Pela corrente i_2 .
 - Por ambas as correntes (campo resultante).

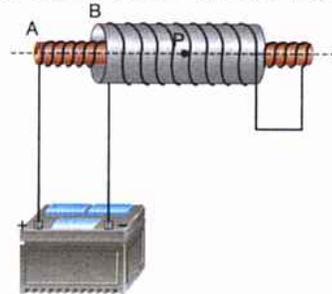


Exercício 11.

- No exercício anterior, deseja-se alterar a corrente i_2 de tal modo que o campo magnético resultante, no ponto P , seja nulo. Para que isso ocorra, qual deve ser a intensidade e o sentido da corrente i_2 ?
- Um solenóide, no ar, é percorrido por uma corrente $i = 3,0$ A que estabelece, em seu interior, um campo magnético $B = 2,0 \times 10^{-3}$ T. Se o comprimento do solenóide é $L = 15$ cm, determine:
 - O número de espiras, n , por unidade de comprimento.
 - O número total, N , de espiras do solenóide.

14. Dois solenóides A e B , de comprimentos $L_A = 20$ cm e $L_B = 10$ cm, são enrolados de maneira que o número total de espiras em A seja $N_A = 400$ espiras e em B seja $N_B = 100$ espiras. O solenóide A é colocado no interior do solenóide B , da maneira mostrada na figura deste exercício, sendo ambos alimentados por uma corrente $i = 5,0$ A, fornecida por uma bateria. Considere o ponto P situado no eixo comum dos dois solenóides.
- a) Os campos magnéticos \vec{B}_A e \vec{B}_B , que A e B estabelecem em P , têm o mesmo sentido ou sentidos contrários?

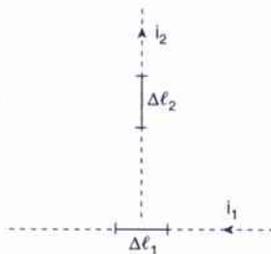
- b) Determine o módulo do campo magnético estabelecido em P pelos dois solenóides.



Exercício 14.

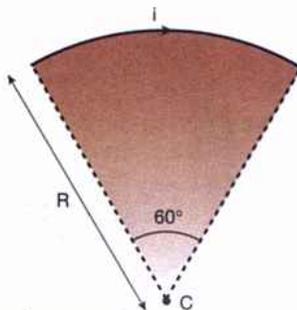
Problemas suplementares

1. Na figura deste problema estão representados dois elementos de corrente: $\Delta\ell_1$ (percorrido por uma corrente i_1) e $\Delta\ell_2$ (percorrido por uma corrente i_2).
- a) Qual é a direção e o sentido da força $\Delta\vec{F}_{12}$ que o elemento $\Delta\ell_1$ exerce sobre o elemento $\Delta\ell_2$?
- b) Qual o módulo do campo magnético $\Delta\vec{B}_2$ que $\Delta\ell_2$ estabelece na posição ocupada por $\Delta\ell_1$? Então, o que se pode dizer da força $\Delta\vec{F}_{21}$?
- c) Uma lei fundamental da Física Clássica está sendo violada nessa interação entre os elementos de corrente. Qual é essa lei?



Problema suplementar 1.

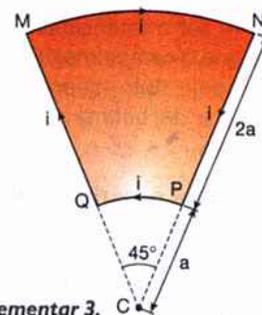
2. Considere um fio condutor, percorrido por uma corrente i , com a forma de um arco de circunferência de raio R , subtendendo um ângulo central de 60° , como mostra a figura deste problema. Usando a lei de Biot-Savart e



Problema suplementar 2.

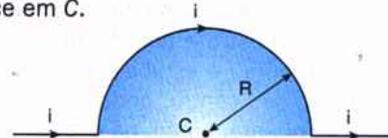
acompanhando o desenvolvimento do cálculo apresentado na seção E-2, quando estudamos o campo magnético no centro de uma espira circular, determine o módulo do campo magnético que esse fio estabelece no centro C da circunferência.

3. Um fio metálico, dobrado na forma do circuito $MNPQ$ (conforme mostra a figura), é percorrido por uma corrente i . As partes MN e PQ são arcos de circunferência de centro em C , subtendendo um ângulo central de 45° .
- a) Qual o módulo do campo magnético que as partes MQ e NP estabelecem no centro C ?
- b) Qual o módulo do campo magnético estabelecido em C pelo circuito $MNPQ$ como um todo?



Problema suplementar 3.

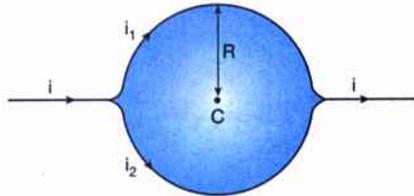
4. A figura deste problema representa parte de um circuito elétrico, percorrido por uma corrente i , constituída por dois trechos retilíneos e uma semicircunferência de raio R . Determine o módulo do campo magnético que essa parte do circuito estabelece em C .



Problema suplementar 4.

5. Um condutor retilíneo se bifurca em dois ramos semicirculares, de raio R , como mostra a figura deste problema. Determine o módulo do campo magnético que o condutor estabelece em C , supondo que:

- a) $i_1 = i_2 = i/2$.
b) $i_1 = i/3$ e $i_2 = 2i/3$.

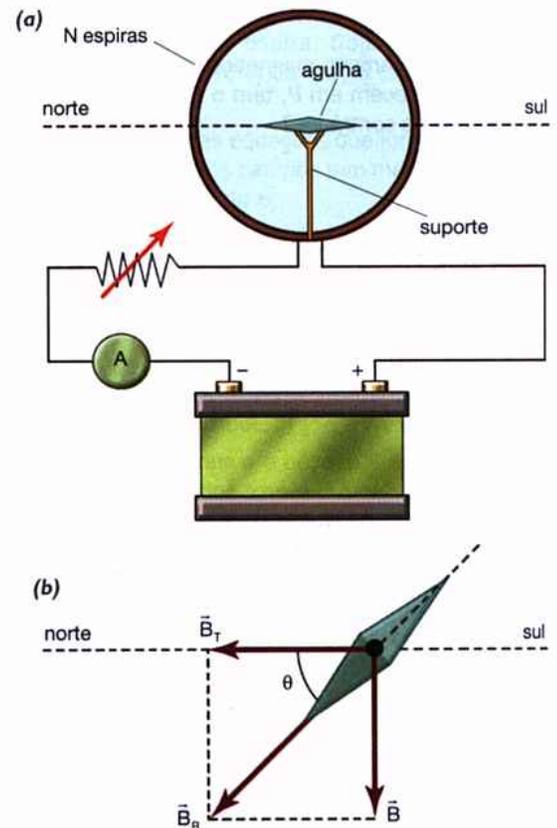


Problema complementar 5.

6. Um fio condutor é enrolado de modo a formar N espiras circulares superpostas, todas com raios praticamente iguais a R e situadas aproximadamente no mesmo plano (bobina chata).
- a) Supondo $N = 10$ espiras, $R = 15$ cm e que a corrente em cada espira seja $i = 0,50$ A, determine o módulo do campo magnético no centro dessa bobina.
- b) Para se obter um campo magnético igual àquele encontrado em (a), qual deveria ser a intensidade da corrente se a bobina fosse substituída por uma única espira?
7. Um solenóide comprido, enrolado com 20 espiras/cm, é percorrido por uma corrente de 0,30 A. Uma bobina chata (veja o problema anterior), com 15 espiras circulares de raio igual a 10 cm, é colocada envolvendo a parte central do solenóide, de modo que o eixo desse solenóide seja perpendicular ao plano da bobina e passe pelo seu centro C . Qual deve ser a intensidade da corrente na bobina para que o campo magnético resultante em seu centro C seja nulo (suponha que os campos do solenóide e da bobina tenham, em C , sentidos contrários).

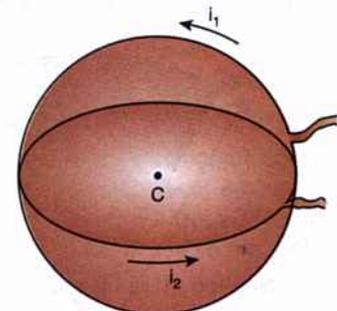
8. **Um problema experimental: medida do campo magnético da Terra.** Para medir o valor do campo magnético terrestre em sua cidade, um estudante construiu uma bobina chata, de raio $R = 15$ cm, tendo $N = 20$ espiras. No centro dessa bobina, sobre um suporte ali adaptado, colocou uma pequena agulha imantada (bússola). A bobina foi posicionada de tal modo que seu plano coincidisse com a orientação da agulha magnética, isto é, aproximadamente na direção norte-sul (veja a figura (a) deste problema). Nessas condições, a bobina foi ligada a um circuito, contendo um reostato, um amperímetro e uma bateria, que lhe fornece uma corrente i e estabelece um campo magnético \vec{B} em seu centro, onde se encontra a agulha. Esta se orienta, então, na direção do campo magnético \vec{B}_R , resultante dos campos magnéticos da

Terra (\vec{B}_T) e da bobina (\vec{B}), como mostra a figura (b) deste problema. Por meio do reostato, o estudante fez variar a corrente na bobina, até que o ângulo θ mostrado na figura (b) fosse igual a 45° . Quando isso ocorreu, o amperímetro indicava uma corrente $i = 0,40$ A. Qual é o valor encontrado pelo estudante para o campo magnético da Terra no local da experiência?



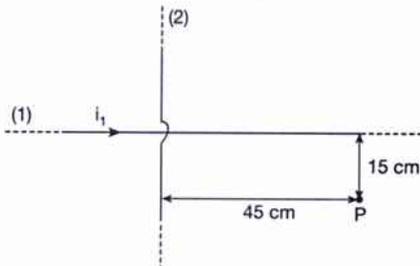
Problema complementar 8.

9. Duas espiras circulares, no ar, de mesmo raio $R = 2\pi$ cm e mesmo centro C , são dispostas de tal modo que seus planos sejam perpendiculares (veja a figura deste problema). Se as espiras são percorridas pelas correntes $i_1 = 3,0$ A e $i_2 = 4,0$ A, determine o módulo do campo magnético que elas estabelecem em C .



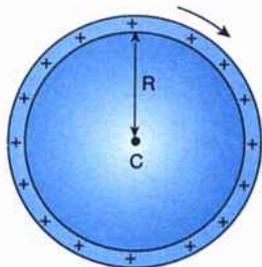
Problema complementar 9.

10. Os fios (1) e (2) mostrados na figura deste problema são retilíneos e muito compridos, estando ambos no ar. Há, no fio (1), uma corrente $i_1 = 5,0$ A e uma corrente i_2 no fio (2). Deseja-se que o campo magnético resultante, devido aos fios, seja nulo no ponto P.
- Qual deve ser o sentido da corrente i_2 no fio (2)?
 - Qual deve ser o valor de i_2 ?



Problema suplementar 10.

11. Este problema se refere a uma importante experiência, realizada em 1901, na qual ficou evidenciado que, realmente, um campo magnético tem sua origem em cargas elétricas em movimento. A experiência consistiu em eletrizar um anel fino, de raio R , com uma carga Q , colocando-o em rápida rotação em torno de um eixo que passa pelo seu centro C (veja a figura deste problema). Feito isso, foi possível detectar a presença de um campo magnético em C e medir o seu valor.
- Considerando $Q = 1,5 \times 10^{-8}$ C e que o anel efetuava 120 rotações/s, determine a intensidade da corrente equivalente à carga Q colocada em movimento.
 - Sendo $R = 5,0$ cm, determine o módulo do campo magnético que seria detectado no centro do anel. (Apesar do valor muito pequeno deste campo, os cientistas conseguiram detectá-lo ainda no início do século XX.)



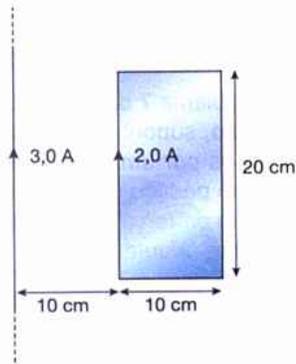
Problema suplementar 11.

12. Em um átomo de hidrogênio (modelo de Bohr), o elétron gira em torno do núcleo numa trajetória circular de raio $R = 5,1 \times 10^{-11}$ m, com uma frequência $f = 6,8 \times 10^{15}$ hertz.
- O elétron em movimento equivale a uma corrente elétrica. Qual é a intensidade i dessa corrente? (carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C)

b) Qual o módulo do campo magnético estabelecido pelo elétron no centro do átomo? (Somente a título de comparação, informamos que ímãs muito fortes estabelecem campos magnéticos da ordem de 10 T.)

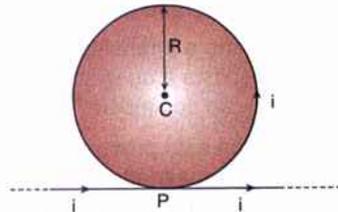
13. No Problema 7 da série Problemas e Testes deste capítulo, suponha que os fios estejam no ar, separados por uma distância r . Considere, no fio (2), um pedaço de comprimento ℓ e determine o módulo da força de atração \vec{F} que o fio (1) exerce sobre aquele pedaço.
14. A unidade de intensidade de corrente no S.I. (1 A) é definida da seguinte maneira: "1 A é a intensidade de uma corrente constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, no vácuo, separados por uma distância de 1 m, dá origem a uma força de 2×10^{-7} N/m entre esses condutores".
Suponha que os condutores referidos no problema anterior estejam separados pela distância $r = 1$ m e que um deles exerça sobre cada metro do outro uma força $F = 2 \times 10^{-7}$ N. Sendo ambos percorridos pela mesma corrente i .
- Determine a intensidade dessa corrente.
 - Sua resposta à questão (a) está de acordo com a definição do ampère?
15. Uma pessoa está procurando se orientar, usando uma agulha magnética. Entretanto, ela observa que diretamente sobre sua cabeça, a 10 m de altura, passa uma linha de transmissão transportando uma corrente contínua, cuja intensidade é 2 000 A. Você acha que essa linha poderia perturbar significativamente a orientação da pessoa? (Lembre-se de que o campo magnético da Terra é da ordem de 10^{-5} T.)
16. No Problema 16 da série Problemas e Testes deste capítulo, suponha que o campo magnético da Terra fosse igual a $2,0 \times 10^{-5}$ T e que a corrente no fio fosse de 5,0 A. A que distância do fio estariam situados os pontos onde o campo magnético é nulo?
17. No Problema 12 da série Problemas e Testes deste capítulo, suponha que o solenóide tenha sido enrolado com 100 espiras e que seu comprimento seja de 50 cm. Fazendo passar no solenóide uma corrente $i = 0,20$ A, verifica-se que a agulha se desvia de um ângulo θ em relação à direção norte-sul. Sabendo-se que o campo magnético da Terra no local da experiência vale $2,2 \times 10^{-5}$ T, determine o valor de θ .
18. Uma espira retangular, percorrida por uma corrente de 2,0 A, é colocada nas proximidades de um fio longo e reto, percorrido por uma corrente de 3,0 A, da maneira mostrada na figura deste problema. Determine o módulo, a direção e o

sentido da força magnética resultante que o fio exerce sobre a espira.



Problema suplementar 18.

19. Um fio condutor é disposto da forma mostrada na figura deste problema (o fio é recoberto com isolante elétrico e, assim, não há contato entre os condutores em P). Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético que a corrente nesse fio estabelece no ponto C .

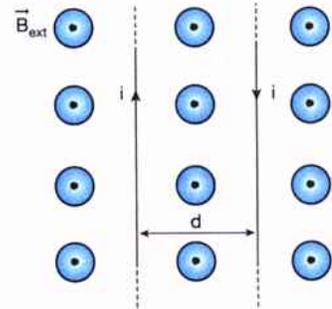


Problema suplementar 19.

20. Suponha que um feixe retilíneo de elétrons, ao abandonar um ciclotron, esteja se deslocando com uma velocidade $v = 3,0 \times 10^6$ m/s e que o número de elétrons, por unidade de volume, no feixe, seja $n = 2,0 \times 10^{14}$ elétrons/m³. Sendo $A = 0,10$ mm² a área de secção reta do feixe e lembrando que o módulo da carga do elétron é $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C:

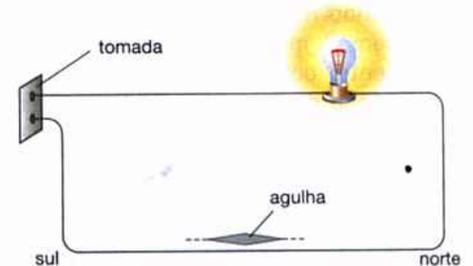
- Determine a intensidade da corrente constituída pelo feixe de elétrons.
- Calcule o módulo do campo magnético estabelecido pelos elétrons a uma distância $r = 1,0$ cm do feixe.

21. Dois fios retos e compridos, no ar, são percorridos por correntes de mesma intensidade $i = 15$ A, porém de sentidos contrários. Como sabemos, esses fios se repelem (veja o Problema 8 dos Problemas e Testes). Aplicando, porém, na região onde estão os fios, um campo magnético externo uniforme $B_{\text{ext}} = 4,0 \times 10^{-5}$ T, como mostra a figura deste problema, verificamos que, para uma certa distância d , não haverá nenhuma força atuando em ambos os fios. Determine o valor de d .



Problema suplementar 21.

22. Tentando reproduzir a experiência de Oersted, em sua residência, montou um circuito igual àquele mostrado na figura deste problema. Sabia que no circuito estava passando uma corrente de, aproximadamente, 1 A e, apesar disso, não percebeu nenhum desvio da agulha magnética colocada nas proximidades do fio orientado na direção norte-sul (veja a figura). Por que razão o desvio esperado pelo estudante não ocorreu? Procure reproduzir essa experiência e observe se o resultado está de acordo com o que foi relatado.

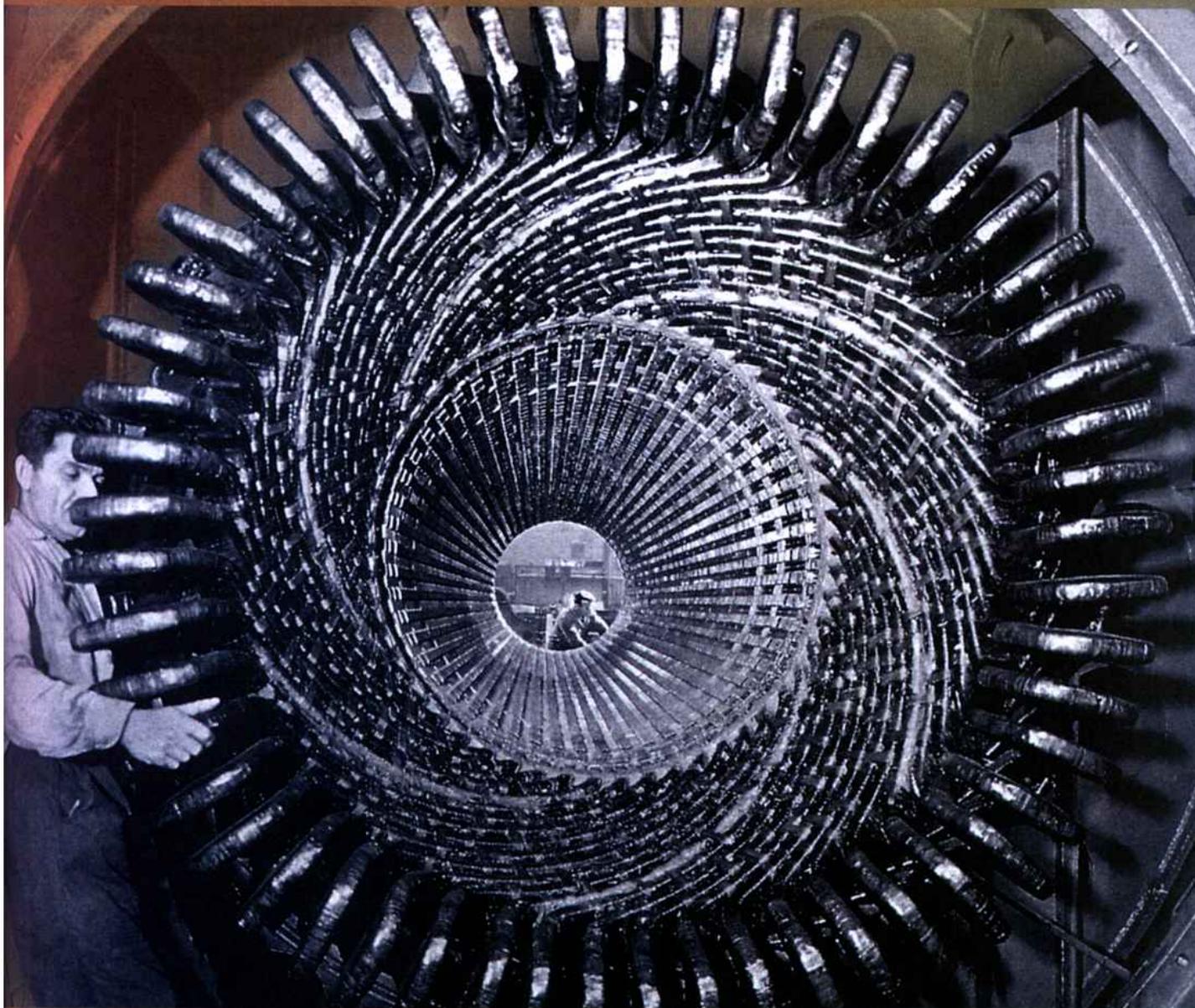


Problema suplementar 22.

capítulo 24

indução eletromagnética

ondas eletromagnéticas



Stock Photos

Parte de um gerador industrial de corrente alternada, denominada estator. Eletroímãs potentes giram no interior deste dispositivo, gerando corrente de acordo com o fenômeno de indução eletromagnética.

Sabemos que a produção de corrente elétrica requer o consumo de uma forma qualquer de energia. Até a época de Faraday, porém, somente a energia química era transformada em energia elétrica, de maneira aproveitável, através de pilhas ou baterias. Mas este processo não é adequado para produzir grandes quantidades de energia elétrica, como são as necessárias para iluminar nossas cidades (fig. 24-1) ou alimentar as indústrias.

Em 1831, Faraday descobriu o fenômeno da indução eletromagnética, que provocou uma verdadeira revolução no estudo do Eletromagnetismo. Graças a esta descoberta, foi possível construir os *dínamos*, que são aparelhos cujo funcionamento se baseia no fenômeno da indução eletromagnética e que transformam energia mecânica (de uma queda-d'água, por exemplo) em energia elétrica. A fotografia da fig. 24-2 mostra um grande dínamo de uma moderna usina hidrelétrica, capaz de gerar enormes quantidades de energia elétrica.

Neste capítulo, analisaremos o trabalho de Faraday sobre o fenômeno da indução eletromagnética, descreveremos como esta pesquisa foi utilizada na construção dos dínamos e dos transformadores e mostraremos como o grande físico escocês, J. Maxwell, desenvolveu a teoria das ondas eletromagnéticas apoiando-se nas descobertas de Faraday.



Fig. 24-1: A enorme quantidade de energia elétrica, usada para iluminar as grandes cidades, é gerada graças ao fenômeno da indução eletromagnética.

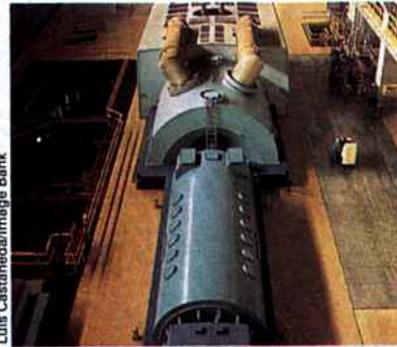


Fig. 24-2: Dínamo de uma grande usina hidrelétrica.

24.1. Força eletromotriz induzida

CONDUTOR EM MOVIMENTO DENTRO DE UM CAMPO MAGNÉTICO

Consideremos um condutor metálico, movimentando-se com uma velocidade \vec{v} , perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético \vec{B} . A fig. 24-3-a ilustra esta situação: a barra metálica CD está sendo deslocada dentro do campo magnético criado pelo ímã mostrado na figura. Na fig. 24-3-b, esta mesma situação é apresentada em corte: o vetor \vec{B} penetrando no papel e a barra CD deslocando-se para a direita.

Como sabemos, a barra metálica possui elétrons livres. Então, como estes elétrons estão em movimento (devido ao movimento da barra), eles ficarão sujeitos à ação de uma força magnética exercida pelo campo \vec{B} . É fácil verificar, usando a regra do tapa na fig. 24-3-b, que esta força tende a deslocar os elétrons para a extremidade C da barra. Como estão livres, eles realmente se deslocam, acumulando-se em C . Conseqüentemente, teremos uma separação de cargas na barra CD , isto é, a extremidade D ficará eletrizada positivamente e a extremidade C , negativamente (fig. 24-3-b).

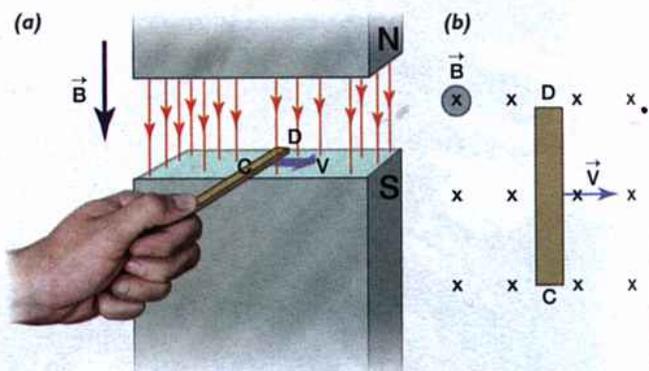


Fig. 24-3: Ilustração esquemática. Barra metálica sendo deslocada dentro de um campo magnético.

Enquanto a barra estiver se movimentando dentro do campo, esta separação de cargas permanecerá e, portanto, uma diferença de potencial será mantida entre suas extremidades C e D . Podemos, então, concluir que esta barra se comporta como um gerador de f.e.m. Em outras palavras, ela é equivalente a uma pilha ou a uma bateria, como procuramos ilustrar na fig. 24-4. Esta f.e.m. que aparece na barra, devido ao seu movimento em um campo magnético, é denominada *força eletromotriz induzida*.

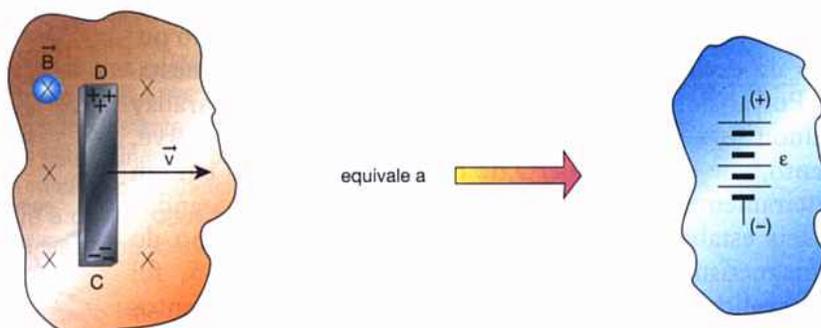


Fig. 24-4: Uma barra metálica sendo deslocada em um campo magnético é equivalente a uma pilha ou bateria.



Fig. 24-5: Uma corrente induzida, no sentido indicado, é estabelecida no trilho GEFH quando a barra CD se desloca sobre ele para a direita.

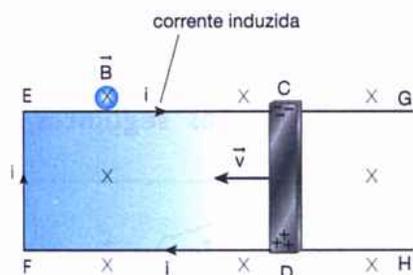


Fig. 24-6: Se a barra CD se deslocar para a esquerda, a corrente induzida no trilho GEFH terá o sentido indicado.

CORRENTE INDUZIDA EM UM CIRCUITO

Suponha que a barra CD da fig. 24-3-b, ao se deslocar, esteja apoiada sobre o trilho metálico $GEFH$, como mostra a fig. 24-5. Desta maneira, teremos um circuito elétrico fechado, constituído pela barra e pelo trilho. Em virtude da diferença de potencial existente entre os extremos da barra, uma corrente passará neste circuito no sentido $CEFD$ (veja a fig. 24-5). Como esta corrente foi estabelecida pela f.e.m. induzida na barra, ela é denominada *corrente induzida*.

É fácil perceber que se a barra CD for deslocada para a esquerda, como mostra a fig. 24-6, haverá uma inversão na separação de cargas, isto é, a extremidade D se comportará como o pólo positivo de uma pilha e a extremidade C , como o pólo negativo. A corrente induzida, então, passará a circular no sentido $DFEC$ (contrário ao sentido da fig. 24-5). Assim, se movimentarmos a barra sucessivamente para a direita e para a esquerda teremos, no circuito, uma corrente ora em um sentido, ora em sentido contrário. Esta corrente que muda periodicamente de sentido, como dissemos no capítulo 20, é uma *corrente alternada*. Portanto, movimentando-se a barra para um lado e para o outro, dentro do campo magnético, teremos um *gerador de corrente alternada*. Os geradores de corrente alternada usados na prática, embora se baseiem no mesmo princípio, funcionam de maneira diferente, como veremos na secção seguinte.

OUTROS EXEMPLOS DE f.e.m. INDUZIDA

O grande cientista inglês M. Faraday, realizando um número muito grande de experiências no século XIX, verificou que existem várias outras situações nas quais se observa o aparecimento de uma f.e.m. induzida em um circuito.

Na fig. 24-7, por exemplo, mostramos uma situação em que isto ocorre. Ao aproximarmos o pólo de um ímã de uma espira que se encontra em repouso, observa-se o aparecimento de uma corrente nesta espira (detectada pelo amperímetro *A*). Se interrompermos o movimento do ímã, a corrente desaparecerá imediatamente e, ao afastarmos o ímã, a corrente tornará a aparecer na espira, porém em sentido contrário ao anterior. Se uma corrente aparece na espira, é porque existe uma f.e.m. responsável por ela. Então, o fato de o ímã ser aproximado ou afastado da espira fez com que uma f.e.m. aparecesse nesta espira. Por analogia com o que ocorria na fig. 24-5, Faraday denominou esta f.e.m. na espira de *f.e.m. induzida*. Observe, entretanto, que esta descoberta de Faraday se constitui em um fato inteiramente novo, que não pode ser explicado baseando-se em leis estabelecidas anteriormente dentro do campo do Eletromagnetismo (ao contrário, no caso da fig. 24-5, foi possível explicar o aparecimento da f.e.m. com conhecimentos já estudados).

Também no caso da fig. 24-8, Faraday observou o aparecimento de uma f.e.m. induzida. No instante em que a chave *C* é fechada, estabelecendo uma corrente na bobina *F*, o amperímetro *A* acusa o aparecimento de uma corrente induzida na bobina *G*. Enquanto *C* permanece fechada, isto é, enquanto existe uma corrente estável em *F*, não se observa corrente induzida em *G*. Entretanto, no instante em que se desliga a chave *C*, a corrente induzida reaparece na bobina *G*, em sentido contrário ao anterior.

Analisando inúmeras outras experiências semelhantes a estas que descrevemos, Faraday conseguiu descobrir que havia um fato comum em todos os casos em que aparece uma f.e.m. induzida. O resultado de suas observações foi expresso em uma lei básica do Eletromagnetismo, que estudaremos na secção seguinte.

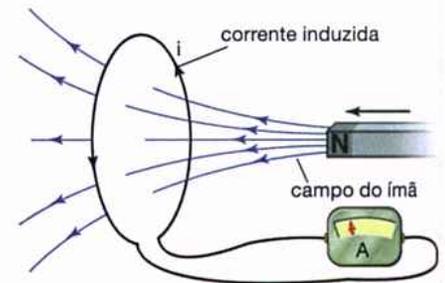


Fig. 24-7: Corrente induzida em uma espira, causada pela aproximação do pólo norte de um ímã.

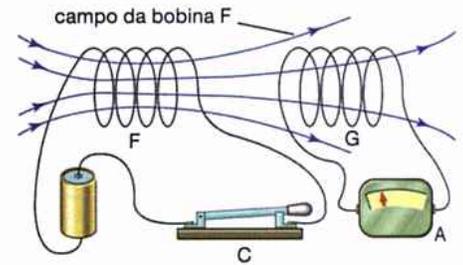
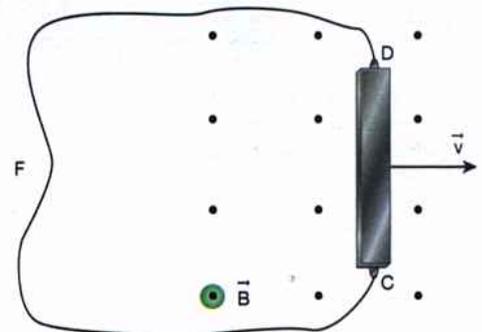


Fig. 24-8: No instante em que a chave *C* é aberta ou fechada, aparece, na bobina *G*, uma corrente induzida.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

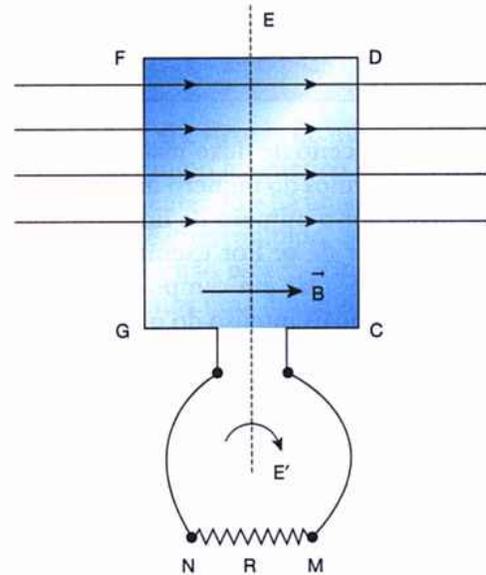
1. Considere uma barra metálica *CD* deslocando-se com velocidade \vec{v} , dentro de um campo magnético \vec{B} saindo do papel (veja a figura deste exercício).
 - a) Qual é o sentido da força magnética que atua nos elétrons livres desta barra?
 - b) Então, diga qual das extremidades da barra ficará eletrizada positivamente e qual ficará eletrizada negativamente.
 - c) Ligando-se *C* e *D* por um fio condutor, como mostra a figura, qual será o sentido da corrente induzida neste fio?



Exercício 1.

2. Responda às questões do exercício anterior supondo que a velocidade da barra estivesse dirigida para a esquerda.
3. Suponha que fosse interrompido o movimento da barra CD mostrada na fig. 24-3-b. A separação de cargas na barra permaneceria? Explique.
4. Se a barra CD , na fig. 24-3-a, fosse deslocada verticalmente para cima, haveria nela uma separação de cargas? Por quê?
5. A figura deste exercício representa uma espira retangular $CDFG$ que gira em torno do eixo EE' , no sentido indicado pela seta curva (no instante mostrado, CD está entrando e FG está saindo do papel). A espira gira dentro de um campo magnético \vec{B} , orientado da esquerda para a direita. Considerando o instante mostrado na figura, responda às questões seguintes:
 - a) Indique qual das extremidades do lado CD fica positiva e qual fica negativa.
 - b) Faça o mesmo para o lado FG .
 - c) Nestas condições, os lados CD e FG são equivalentes a duas baterias. Estas baterias estão ligadas em série ou em paralelo?

d) Então, qual é o sentido da corrente induzida que passa na resistência R ligada às extremidades da espira?



Exercício 5.

24.2. A lei de Faraday

O QUE É FLUXO MAGNÉTICO

Para que possamos entender a lei descoberta por Faraday, sobre a f.e.m. induzida, temos necessidade de conhecer um conceito muito importante, que vamos analisar a seguir: o conceito de fluxo magnético.

Consideremos uma superfície plana, de área A , colocada dentro de um campo magnético uniforme \vec{B} . Traçando-se uma perpendicular à superfície, designemos por θ o ângulo formado por esta normal N com o vetor \vec{B} (veja a fig. 24-9). O fluxo magnético através desta superfície é representado pela letra grega ϕ (fi) e definido pela seguinte expressão:

$$\phi = BA \cos \theta$$

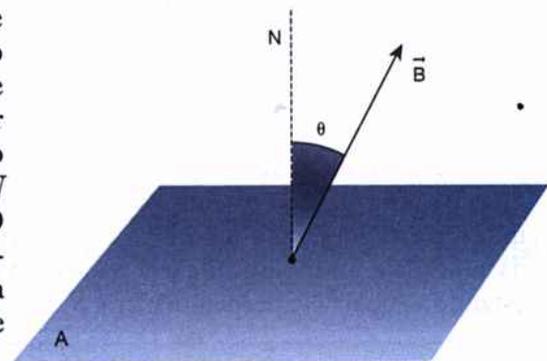


Fig. 24-9: O fluxo magnético, ϕ , através da superfície A , é dado pela expressão: $\phi = BA \cos \theta$.

No S.I., a unidade de fluxo magnético é denominada 1 weber = 1 Wb, em homenagem ao físico alemão do século XIX, W. Weber. Então, medindo-se B em tesla (T) e A em m^2 , teremos:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot m^2$$

Wilhelm Eduard Weber (1804-1891).

Físico alemão que, juntamente com o físico Gauss, estudou o magnetismo terrestre. Em 1833 desenvolveu o telégrafo eletromagnético. A unidade de fluxo magnético recebeu o seu nome em virtude dos inúmeros trabalhos que desenvolveu no campo da ciência do magnetismo.



O conceito de fluxo magnético através de uma superfície pode ser interpretado em termos do número de linhas de indução que furam esta superfície: quanto maior for o número de linhas de indução que atravessam a superfície, maior será o valor de ϕ . Por exemplo, na fig. 24-10 temos duas superfícies de áreas iguais, colocadas em campos magnéticos diferentes. Em (a) temos um campo magnético mais intenso do que em (b), porque as linhas de indução do campo \vec{B}_1 estão mais próximas umas das outras do que as linhas do campo \vec{B}_2 . Evidentemente, o número de linhas que furam a superfície, na figura (a), é maior do que na figura (b), isto é, o valor do fluxo ϕ_1 é maior do que ϕ_2 . Observe que este resultado está de acordo com a expressão $\phi = BA \cos \theta$, a qual nos mostra que quanto maior for o valor de B , maior será o valor do fluxo ϕ .

É fácil perceber que quanto maior for a área da superfície colocada em um dado campo \vec{B} , maior será o número de linhas de indução que furam a superfície, isto é, maior será o valor do fluxo. Este resultado também está de acordo com a relação $\phi = BA \cos \theta$ (quanto maior for A , maior será ϕ).

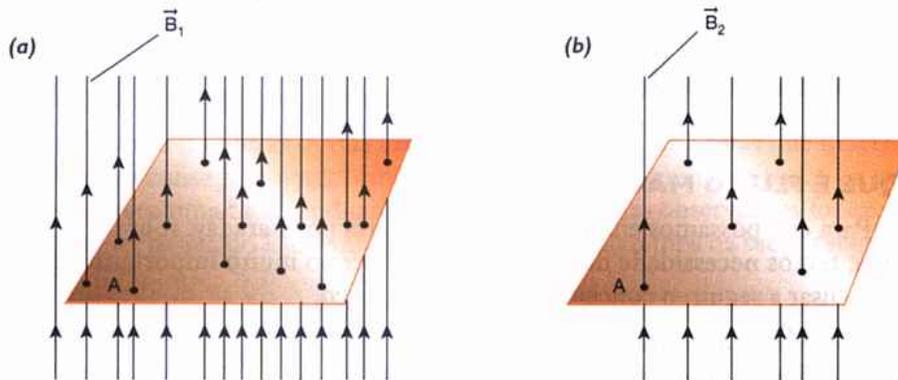


Fig. 24-10: O fluxo magnético ϕ , em (a) é maior do que o fluxo ϕ_2 , em (b).

Finalmente, devemos observar que o valor de ϕ depende do ângulo θ , isto é, o fluxo magnético através de uma superfície depende da inclinação desta superfície em relação ao vetor \vec{B} . A fig. 24-11 ilustra este fato em termos das linhas de indução que passam através da superfície: em (a), nenhuma linha de indução está furando a superfície e, portanto, temos $\phi = 0$; em (b), a inclinação da superfície foi modificada e já temos um certo fluxo ϕ através dela e, em (c), estando a superfície perpendicular a \vec{B} , temos um valor máximo para o fluxo ϕ .

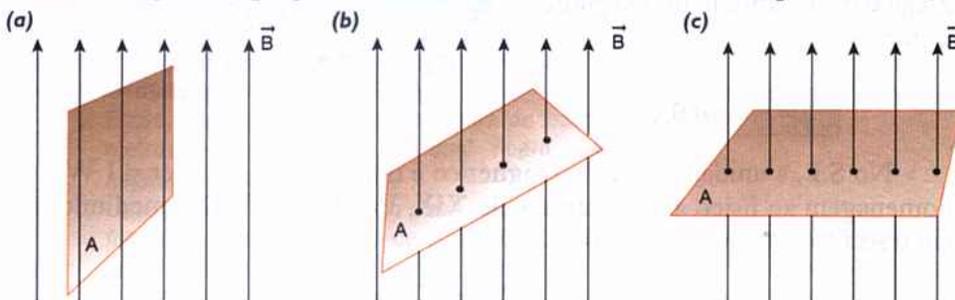


Fig. 24-11: O fluxo magnético através de uma superfície depende da inclinação da superfície em relação ao vetor \vec{B} .

A LEI DE FARADAY

Como dissemos na secção anterior, Faraday conseguiu perceber que havia um fato comum em todas as situações nas quais aparecia uma f.e.m. induzida. Analisando o grande número de experiências que ele mesmo realizou, Faraday verificou que *sempre que uma f.e.m. induzida aparecia em um circuito, estava ocorrendo uma variação do fluxo magnético através deste circuito.*

De fato, na experiência mostrada na fig. 24-5, em virtude do movimento da barra para a direita, a área do circuito dentro do campo magnético está aumentando. Assim, o fluxo ϕ através do circuito está aumentando e há uma f.e.m. induzida neste circuito. Quando o movimento da barra é interrompido, embora exista um fluxo magnético através do circuito, este fluxo não está variando e, nestas condições, não há f.e.m. induzida. Na fig. 24-6, temos uma diminuição do fluxo através do circuito (área diminuindo) e, novamente, observamos o aparecimento de uma f.e.m. induzida.

Da mesma forma, quando o ímã é aproximado ou afastado da espira na fig. 24-7, o fluxo magnético através desta espira está variando e, mais uma vez, uma f.e.m. é induzida no circuito.

No caso da fig. 24-8, quando a chave C é fechada, a corrente que é estabelecida na bobina F cria um campo magnético que causa um fluxo através da bobina G . Portanto, o fluxo ϕ através de G aumentou de zero até um certo valor e uma f.e.m. induzida aparece nesta bobina. Enquanto a chave C permanece fechada, a corrente em F mantém-se constante e, portanto, será também constante o fluxo através da bobina G . Nestas condições, não há f.e.m. induzida em G . No instante em que a chave C é aberta, o fluxo que existia em G desaparece (o fluxo em G diminui) e verifica-se, novamente, o aparecimento de uma f.e.m. induzida.

Portanto, a f.e.m. induzida apareceu em todos os casos nos quais estava havendo uma variação do fluxo magnético. Além disso, Faraday observou que o valor da f.e.m. induzida era tanto maior quanto mais rapidamente se processasse a variação do fluxo através do circuito. Mais precisamente, ele verificou que, se durante um intervalo de tempo Δt o fluxo magnético através de um circuito variar de $\Delta\phi$, haverá, neste circuito, uma f.e.m. induzida dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

O fenômeno do aparecimento de uma f.e.m. induzida foi denominado *indução eletromagnética* e o resultado que acabamos de estudar tornou-se conhecido como *Lei de Faraday da Indução Eletromagnética*. Esta lei, que é fundamental para o estudo dos fenômenos eletromagnéticos, pode ser assim resumida:

Lei de Faraday (da Indução Eletromagnética)

Sempre que ocorrer uma variação do fluxo magnético através de um circuito, aparecerá, neste circuito, uma f.e.m. induzida. O valor desta f.e.m., ε , é dado por

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

onde $\Delta\phi$ é a variação do fluxo observada no intervalo de tempo Δt .

Exemplo 1

Suponha que na fig. 24-7 o ímã, a uma certa distância da espira, esteja estabelecendo através dela um fluxo $\phi_1 = 1,2 \times 10^{-2}$ Wb. Aproximando rapidamente o ímã da espira, o fluxo passa a valer $\phi_2 = 4,6 \times 10^{-2}$ Wb. Se esta variação ocorreu em um intervalo de tempo $\Delta t = 0,10$ s:

a) Determinar o valor da f.e.m. induzida na espira.

O valor desta f.e.m. será dado pela lei de Faraday. Então, teremos

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\Delta t} = \frac{4,6 \times 10^{-2} - 1,2 \times 10^{-2}}{0,10} \quad \text{donde} \quad \varepsilon = 0,34 \text{ V}$$

b) Sabendo-se que a resistência da espira vale $R = 2,0 \Omega$, calcular a intensidade da corrente induzida indicada pelo amperímetro.

A intensidade desta corrente será dada pela equação do circuito, isto é,

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0,34}{2,0} \quad \text{donde} \quad i = 0,17 \text{ A}$$

Exemplo 2

Considere uma barra metálica CD deslocando-se com velocidade \vec{v} dentro de um campo magnético uniforme \vec{B} . A barra desloca-se apoiando-se em dois trilhos, também metálicos, separados de uma distância L , como mostra a fig. 24-12. Usando a lei de Faraday, determinar, em função de B , L e v , a f.e.m. induzida na barra.

De acordo com a lei de Faraday, a f.e.m. induzida é dada por $\varepsilon = \Delta\phi/\Delta t$. Suponhamos que, durante o intervalo de tempo Δt , a barra se desloque de uma distância Δx , passando para a posição C'D' (fig. 24-12). Então, neste intervalo de tempo, como o campo magnético é perpendicular à área do circuito ($\theta = 0^\circ$), a variação do fluxo através deste circuito será dada por:

$$\Delta\phi = B \cdot (\text{variação na área do circuito})$$

ou

$$\Delta\phi = B \cdot (\text{área } CDD'C') = B \cdot (L \Delta x)$$

Logo, teremos

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{BL \Delta x}{\Delta t}$$

Como $\Delta x/\Delta t = v$, virá

$$\varepsilon = BLv$$

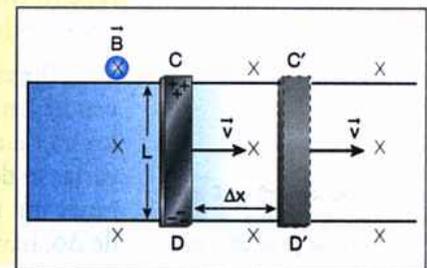


Fig. 24-12: Para o exemplo 2.

O GERADOR DE CORRENTE ALTERNADA

Acabamos de aprender que uma f.e.m. é induzida em um circuito sempre que variar o fluxo magnético através dele (lei de Faraday). Veremos agora como este princípio básico é utilizado na construção dos *dínamos*, isto é, de geradores capazes de produzir grandes quantidades de energia elétrica. Analisando a fig. 24-13, poderemos entender como isto é feito.

Um dínamo é constituído, basicamente, por uma espira que gira dentro de um campo magnético. A fig. 24-13 mostra uma espira metálica nesta situação, girando em torno do eixo EE' entre os pólos de um ímã. Nas extremidades da espira existem dois anéis, C e D, que deslizam sobre os contatos F e G, os quais ligam a espira a um circuito externo qualquer. No caso da fig. 24-13, este circuito externo é um amperímetro, usado para indicar a presença de corrente induzida.

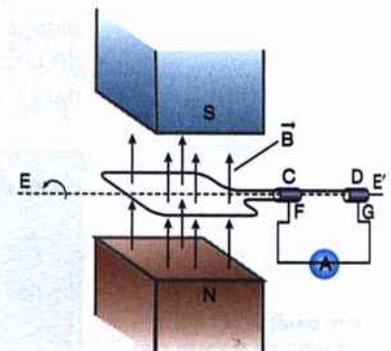


Fig. 24-13: Uma espira girando dentro de um campo magnético produz uma corrente alternada.



Tom Campbell/Getty Images

Fig. 24-14: Conjunto de geradores que transformam a energia mecânica de uma queda-d'água em energia elétrica.

Enquanto a espira gira, podemos perceber que há uma variação do fluxo magnético através dela. Isto ocorre porque a inclinação da espira, em relação ao vetor \vec{B} , está variando continuamente, conforme vimos ao analisar a fig. 24-11. Então, uma f.e.m. é induzida na espira, gerando uma corrente que será indicada pelo amperímetro. Durante uma meia-volta da espira, o fluxo magnético através dela está aumentando e, ao efetuar uma meia-volta seguinte, o fluxo estará diminuindo. Por este motivo, a corrente induzida aparecerá, no circuito, ora em um sentido, ora em sentido contrário. Em outras palavras, a espira girando dentro de um campo magnético gera uma *corrente alternada*, como se pode perceber pela indicação do amperímetro.

Os grandes geradores de corrente alternada (fig. 24-14), encontrados nas usinas hidrelétricas, funcionam de maneira semelhante à que acabamos de descrever. A energia de uma queda-d'água é aproveitada para colocar em rotação estes geradores, transformando, então, grandes quantidades de energia mecânica em energia elétrica.

COMENTÁRIOS

- 1) O gráfico da fig. 24-15 mostra como a corrente alternada, gerada na espira, varia com o tempo, à medida que ela gira dentro do campo magnético.

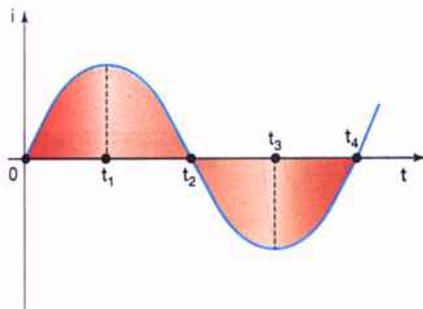
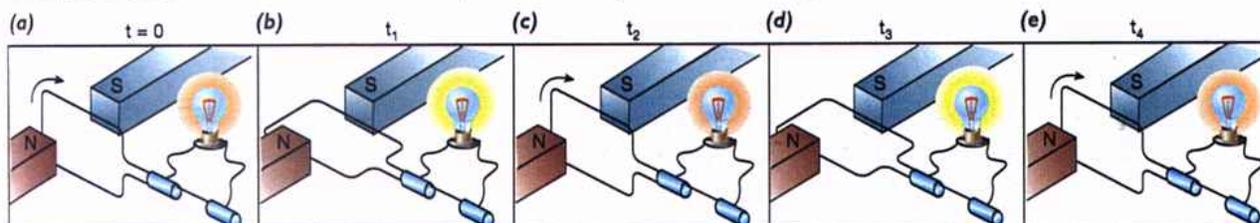


Fig. 24-15: O gráfico mostra como a intensidade da corrente alternada gerada na espira varia com o tempo.

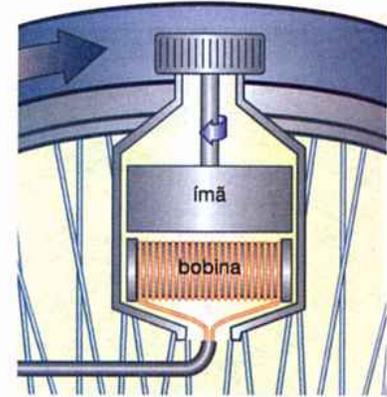
Vamos analisar esta variação, supondo uma lâmpada ligada à espira de um gerador de corrente alternada, como mostra a fig. 24-16. No instante $t = 0$, no qual a espira se encontra na posição mostrada na fig. 24-16-a, a lâmpada está apagada, mostrando que, neste instante, não há corrente no circuito. Observe que o gráfico da fig. 24-15 está de acordo com esta observação, pois, para $t = 0$, temos, neste gráfico, $i = 0$. Enquanto a espira gira, até alcançar a posição mostrada na fig. 24-16-b, a corrente cresce, atingindo seu valor máximo nesta posição (instante t_1 no gráfico da fig. 24-15). Conseqüentemente, a lâmpada adquire seu maior brilho neste momento. Continuando a girar, a espira alcança a posição mostrada na fig. 24-16-c, onde, novamente, a corrente é nula e, portanto, a lâmpada se apaga (instante t_2 no gráfico da fig. 24-15). A partir de t_2 , a corrente induzida muda de sentido, como está indicado no gráfico (por convenção, a intensidade i passa a ser considerada negativa).

No instante t_3 (fig. 24-16-d), o módulo da corrente alcança novamente seu valor máximo e a lâmpada brilha com a mesma intensidade que ela apresentava na fig. 24-16-b. Finalmente, no instante t_4 (fig. 24-16-e) a espira retorna à sua posição inicial, completando uma volta (1 ciclo). A corrente é novamente nula (a lâmpada está apagada) e, daí em diante, o processo se repete da maneira que acabamos de descrever.

Fig. 24-16: O brilho da lâmpada indica a intensidade da corrente alternada gerada na espira, à medida que ela gira.



- 2) A corrente que usamos em nossas residências é, como já dissemos, alternada. Entretanto, não percebemos flutuações no brilho de uma lâmpada, como na fig. 24-16. Isto acontece porque a corrente alternada fornecida pelas companhias de eletricidade tem uma frequência relativamente alta. Na maioria das cidades, esta frequência é de 60 hertz (60 ciclos/s), isto é, a corrente inverte de sentido 120 vezes em cada 1 s (como se pode observar pela fig. 24-16, em cada volta completa da espira o sentido da corrente se inverte duas vezes). Assim, como as flutuações no brilho da lâmpada são muito rápidas, nossos olhos não conseguem percebê-las e tem-se a sensação de que este brilho é uniforme.



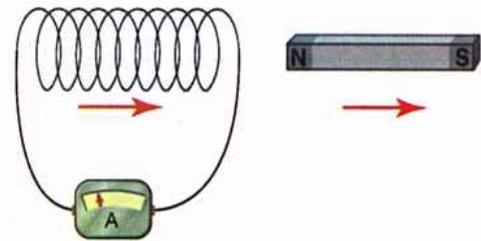
No gerador de uma bicicleta, a variação de fluxo na bobina fixa é causada pela rotação do ímã.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

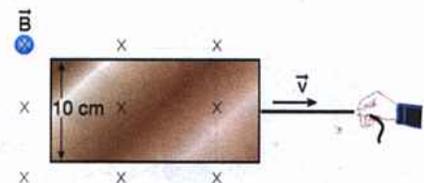
6. Na fig. 24-11-c considere que o campo magnético tenha o valor $B = 3,5 \times 10^{-2}$ T e que a superfície mostrada tenha uma área $A = 60$ cm².
- Qual é o valor do ângulo θ formado pelo vetor \vec{B} com a normal à superfície (considere a normal orientada para cima)?
 - Calcule o valor do fluxo magnético ϕ através da superfície mostrada.
7. Responda às questões (a) e (b) do exercício anterior para o caso da fig. 24-11-a.
- A resposta à questão (b) concorda com o que foi afirmado no texto em relação a esta figura?
8. Suponha que a superfície mostrada na fig. 24-11 fosse contornada por um fio metálico formando uma espira retangular de área A . Suponha, ainda, que a espira passasse da posição (a) para a posição (c) em um intervalo de tempo $\Delta t = 0,03$ s. Considerando as respostas dos exercícios 6 e 7, determine:
- A variação do fluxo magnético, através da espira, neste intervalo de tempo.
 - O valor da f.e.m. induzida na espira.
9. Observe a fig. 24-7 e suponha que tanto o ímã quanto a espira estejam em repouso. Nestas condições:
- Há um fluxo magnético através da espira?
 - Há variação de fluxo magnético através da espira?
 - Então, há f.e.m. induzida na espira?
10. O ímã e a bobina mostrados na figura deste exercício estão ambos se deslocando com a mesma velocidade \vec{v} .

- Há um fluxo magnético através da bobina?
- Há variação de fluxo magnético através da bobina?
- Então, qual será a indicação do amperímetro?



Exercício 10.

11. A espira retangular, mostrada na figura deste exercício, está sendo puxada com uma velocidade $v = 6,0$ m/s, emergindo de um campo magnético $B = 0,50$ T. Lembrando-se da resposta encontrada no exemplo 2 desta seção, determine:
- A f.e.m. induzida na espira.
 - A intensidade da corrente induzida que circula na espira, sabendo-se que sua resistência é de $0,40 \Omega$.



Exercício 11.

12. Na fig. 24-16 suponha que esteja sendo gerada uma corrente alternada de frequência $f = 60$ hertz.
- Quanto tempo a espira gasta para efetuar uma volta completa?
 - Qual é o intervalo de tempo decorrido entre os instantes nos quais a lâmpada apresenta dois brilhos máximos consecutivos (posições da espira mostradas nas figuras b) e d)?)
 - Considerando a resposta da questão anterior, você acha que seus olhos perceberiam flutuações no brilho desta lâmpada?

Usinas geradoras de energia elétrica

As centrais que fornecem energia para os centros consumidores são geralmente de grande porte, gerando potências elevadíssimas (milhares de kW). Entretanto seus geradores funcionam, em princípio, de maneira idêntica ao alternador que acabamos de analisar.

Conforme o tipo de energia usada para fazer girar a espira (ou ímã) do gerador, podemos ter, entre outras, as usinas **hidrelétrica**, **termoelétrica** e **nuclear**:

— **usina hidrelétrica** (fig. I) — nessas usinas, a energia potencial da água armazenada em uma represa se transforma em energia cinética durante sua queda pela tubulação. Essa energia é usada para fazer girar uma turbina e seu movimento de rotação é transmitido ao gerador, produzindo corrente elétrica.

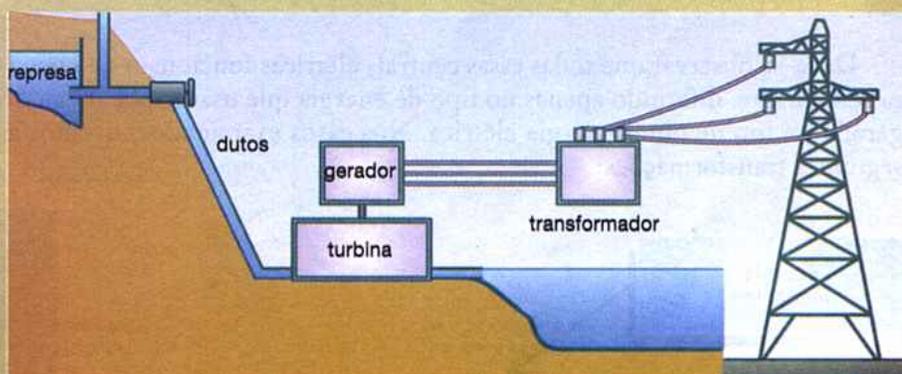


Fig. I: Ilustração esquemática. Na usina hidrelétrica, a energia mecânica da queda-d'água se transforma em energia elétrica.

— **usina termoelétrica** (fig. II) — a energia utilizada nessas usinas é a térmica, obtida pela combustão de madeira, carvão ou petróleo (óleo combustível). A energia térmica desprendida na combustão provoca a vaporização da água contida em uma caldeira. Esse vapor, a alta pressão, faz girar uma turbina e essa rotação é transmitida ao gerador.

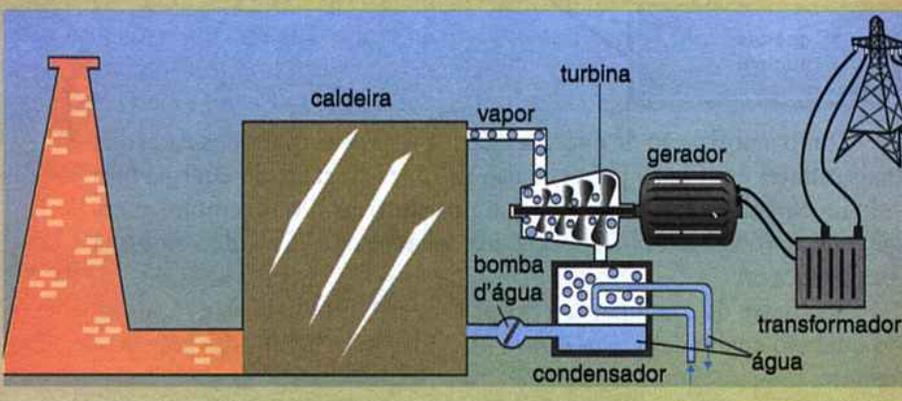


Fig. II: Ilustração esquemática. Na usina termoelétrica, a energia liberada pelo combustível se transforma em energia elétrica.

— **usina nuclear** (fig. III) — as usinas nucleares funcionam de maneira semelhante a uma usina termoeletrica, mas o calor utilizado para produzir o vapor a alta pressão é proveniente de reações nucleares que ocorre em um reator atômico (fissões dos núcleos de alguns elementos, como o urânio). Procure entender o diagrama apresentado na figura e leia, com atenção, as informações da legenda.

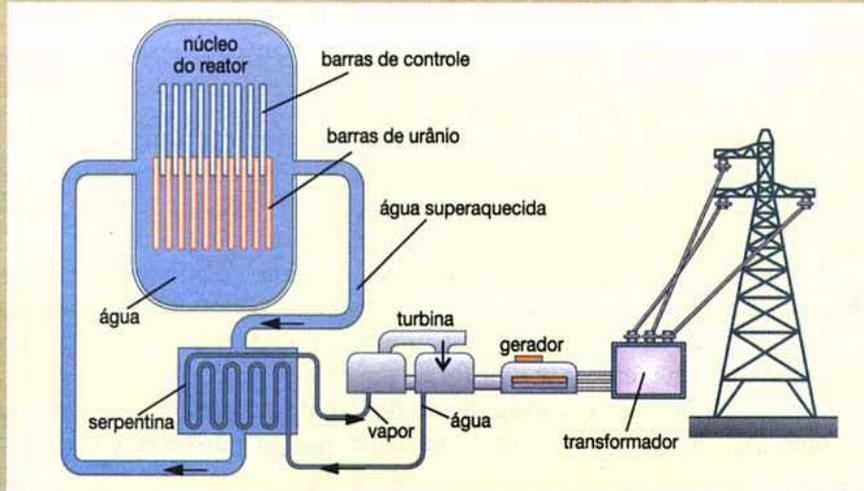
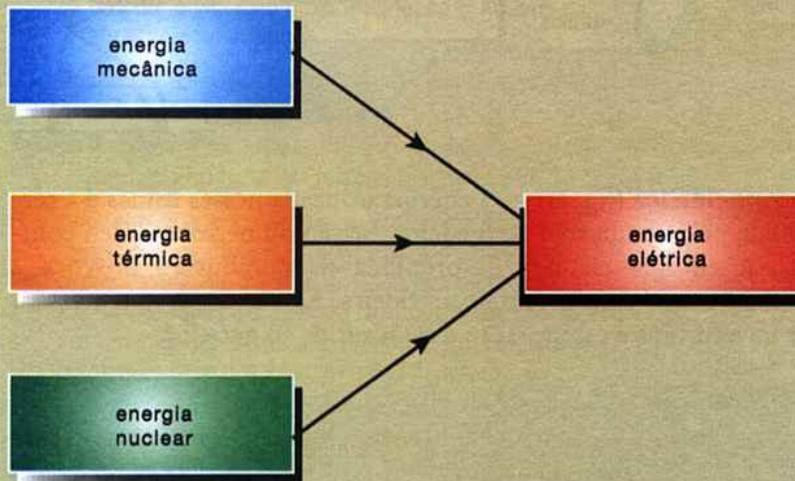


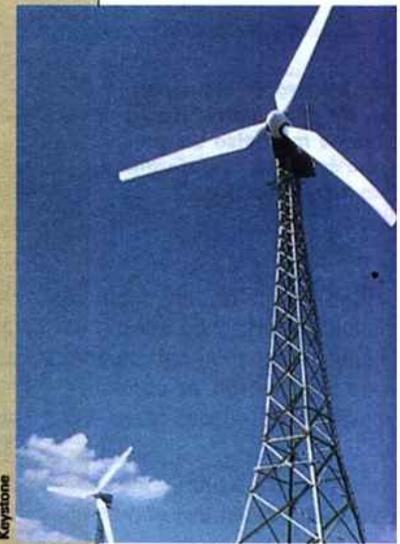
Fig. III: Esquema do funcionamento de uma usina nuclear. A grande quantidade de calor liberada pelas reações nucleares que ocorrem no reator provoca o superaquecimento da água que nele circula. Esta água entra em contato com uma serpentina, fazendo evaporar a água nela contida. O vapor formado é usado para acionar a turbina que coloca o gerador em rotação. Observe que a água superaquecida (que passa pelo reator) circula isoladamente, sem contato direto com qualquer outra parte do conjunto, para evitar contaminação radioativa.

Deve-se observar que todas essas centrais elétricas funcionam de maneira semelhante, diferindo apenas no tipo de energia que usam para acionar o gerador, a fim de obter energia elétrica. Nos casos examinados, tivemos as seguintes transformações:



Como a utilização de energia elétrica vem se tornando, a cada dia, mais intensa em vários países, o uso de outras formas de energia tem sido incentivado para acionar as centrais elétricas. Por exemplo: energia eólica (dos ventos), energia das marés, energia solar, energia geotérmica etc.

Não deixe de examinar o Tópico Especial, no final deste capítulo, no qual são analisadas várias outras informações relacionadas com este assunto.



Esse dispositivo, que costuma ser denominado turbina de vento, aciona um gerador de energia elétrica de 3 000 kW. Portanto, ele transforma energia mecânica do vento (energia eólica) em energia elétrica (cada lâmina do cata-vento chega a ter 30 m de comprimento).

24.3. A lei de Lenz

O SENTIDO DA CORRENTE INDUZIDA

Já analisamos diversas situações nas quais a corrente induzida aparece no circuito, ora em um sentido, ora em sentido contrário. Por exemplo, nas condições mostradas na fig. 24-17 dissemos que, quando o ímã se aproxima da espira, a corrente aparece em um determinado sentido (fig. 24-17-a) e, quando o ímã se afasta, a corrente aparece na espira em sentido contrário ao anterior (fig. 24-17-b).

Embora Faraday tivesse percebido esse fenômeno, ele não conseguiu chegar a uma lei que nos indicasse como determinar o sentido da corrente induzida. Entretanto, em 1834, alguns anos após a divulgação dos trabalhos de Faraday, o cientista russo H. Lenz apresentou uma “regra”, hoje conhecida como *lei de Lenz*, que nos permite resolver este problema. A seguir, apresentaremos a descoberta feita por Lenz e mostraremos como aplicá-la para descobrir o sentido da corrente induzida.

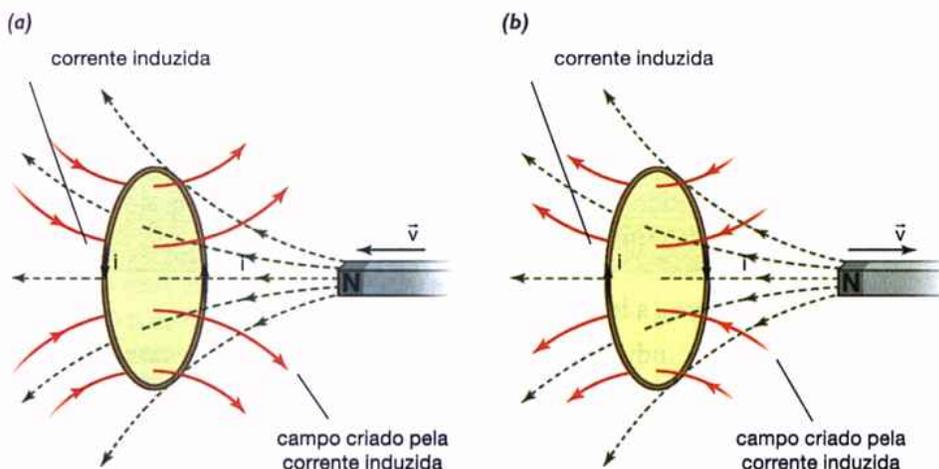


Fig. 24-17: A corrente induzida na espira aparece com sentido tal que o campo magnético que ela cria tende a contrariar a variação de fluxo através desta espira.

A LEI DE LENZ

Consideremos novamente a fig. 24-17-a. Quando o ímã é aproximado da espira, verifica-se que a corrente nela induzida aparece com aquele sentido indicado na figura. Como sabemos, esta corrente cria um campo magnético cujo sentido pode ser determinado pela regra de Ampère. Aplicando esta regra, verificamos que o campo magnético criado pela corrente induzida tem, no interior da espira, o sentido mostrado na fig. 24-17-a. Observe que o sentido deste campo é contrário ao do campo magnético do ímã.

Heinrich F. E. Lenz (1804-1865).

Físico russo que enunciou a lei que permite estabelecer o sentido das correntes induzidas. Lenz estudou também a dependência da resistência elétrica com a temperatura.

Considerando, agora, a fig. 24-22-b, vemos que, quando o ímã é afastado da espira, a corrente induzida aparece em sentido contrário ao anterior. Usando novamente a regra de Ampère, verificamos que o campo magnético criado pela corrente induzida tem, neste caso, o mesmo sentido do campo magnético do ímã (veja a fig. 24-17-b).

Podemos resumir estas observações da seguinte maneira:

- 1º) Quando o fluxo magnético através da espira está *aumentando* (fig. 24-17-a), a corrente induzida tem um sentido tal que o campo magnético por ela criado tende a *diminuir* o fluxo através da espira (o campo da corrente induzida, *dentro da espira*, tem sentido contrário ao campo magnético do ímã).
- 2º) Quando o fluxo magnético através da espira está *diminuindo* (fig. 24-17-b), a corrente induzida tem um sentido tal que o campo magnético por ela criado tende a *aumentar* o fluxo através da espira (o campo da corrente induzida, *dentro da espira*, tem o mesmo sentido do campo magnético do ímã).

Após realizar uma série de experiências semelhantes a esta, Lenz chegou à conclusão de que este comportamento da corrente induzida era observado em todos os casos analisados. Ele sintetizou, então, suas observações da seguinte maneira:

Lei de Lenz

A corrente induzida em um circuito aparece sempre com um sentido tal que o campo magnético que ela cria tende a contrariar a variação do fluxo magnético através da espira.

Em outras palavras, a lei de Lenz nos diz que* :

- 1º) Quando a corrente induzida é estabelecida em virtude de um *aumento* do fluxo magnético, o seu sentido é tal que o campo por ela criado tem *sentido contrário* ao campo magnético existente no interior do circuito.
- 2º) Quando a corrente induzida é estabelecida em virtude de uma *diminuição* do fluxo magnético, o seu sentido é tal que o campo por ela criado tem o *mesmo sentido* do campo magnético existente no interior do circuito.

Os exemplos seguintes ilustrarão como podemos empregar a lei de Lenz para determinar o sentido da corrente induzida em um circuito.

Exemplo 1

Usando a lei de Lenz, determinar o sentido da corrente induzida para a situação mostrada na fig. 24-5.

Vimos que, estando a barra em movimento para a esquerda, há um aumento de fluxo magnético através do circuito CEFD, pois a área do circuito situada dentro do campo magnético está aumentando. Então, o campo criado pela corrente induzida (no interior do circuito) deve ter sentido contrário ao do campo magnético mostrado na fig. 24-5, pois, assim, ele tende a diminuir o fluxo magnético através do circuito. Portanto, o campo magnético criado pela corrente induzida está saindo da folha de papel (no interior do circuito). Usando a regra de Ampère, verificamos que, para criar um campo magnético neste sentido, a corrente induzida deve estar circulando no sentido CEFD.

Observe que este resultado está de acordo com o sentido da corrente mostrado na fig. 24-5 e que foi obtido por outro processo (sem o uso da lei de Lenz).

* Estamos supondo a normal à superfície orientada de tal modo que o fluxo magnético seja sempre positivo.

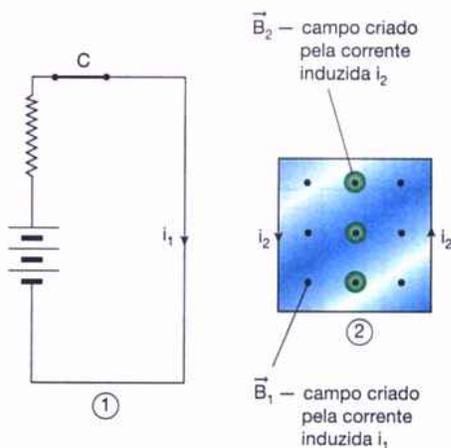


Fig. 24-18: Para o exemplo 2.

Exemplo 2

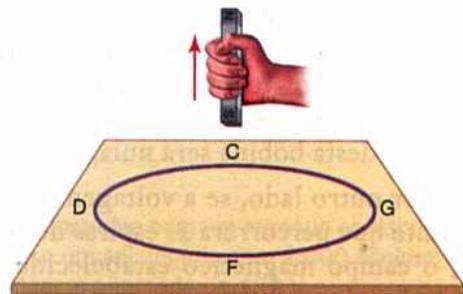
A fig. 24-18 mostra um circuito elétrico 1, no qual circula a corrente i_1 fornecida por uma bateria. Ao lado deste circuito existe uma espira metálica retangular. No momento em que a chave C do circuito 1 é aberta, uma corrente induzida i_2 , de duração muito curta, aparece na espira. Determinar o sentido da corrente i_2 .

A corrente i_1 cria, no espaço em torno dela, um campo magnético \vec{B}_1 . A regra de Ampère nos mostra que, no interior da espira, este campo \vec{B}_1 está saindo da folha de papel, como está indicado na fig. 24-18. Logo, existe um fluxo magnético através da espira. Quando a chave C é aberta, a corrente i_1 é interrompida e este fluxo diminui (tende para zero). Então, na espira aparece uma corrente induzida i_2 e o campo magnético \vec{B}_2 por ela criado, no interior da espira, deve ter o mesmo sentido do campo \vec{B}_1 (tendendo a aumentar o fluxo através do circuito). Usando a regra de Ampère, vemos que, para criar no interior da espira um campo \vec{B}_2 , saindo da folha de papel, o sentido da corrente induzida i_2 deve ser aquele mostrado na fig. 24-18.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

13. Na fig. 24-6, como dissemos no texto, a barra CD está se deslocando para a esquerda sobre os trilhos metálicos. Analise esta figura e responda:
 - a) O fluxo magnético através do circuito CEFD está aumentando ou diminuindo?
 - b) Então, o campo magnético que a corrente induzida cria no interior do circuito deve estar entrando na folha de papel ou saindo dela?
14. Considerando sua resposta à questão (b) do exercício anterior:
 - a) Qual deve ser o sentido da corrente induzida no circuito (use a regra de Ampère)?
 - b) Sua resposta à questão (a) concorda com o sentido da corrente mostrado na fig. 24-6?
15. Suponha que a chave C, na fig. 24-18, esteja inicialmente aberta. Se, em certo instante, esta chave for fechada, uma corrente i_1 será estabelecida pela bateria no circuito 1.
 - a) O campo magnético \vec{B}_1 que esta corrente cria no interior da espira 2 está entrando na folha de papel ou saindo dela?
 - b) O fluxo magnético através da espira 2 aumentou ou diminuiu?
 - c) Então, o campo magnético \vec{B}_2 , que a corrente induzida na espira 2 cria no seu interior, deve estar entrando na folha de papel ou saindo dela?
16. a) Considere sua resposta à questão (c) do exercício anterior e, usando a regra de Ampère, determine o sentido da corrente induzida i_2 .
 - b) Decorrido um certo tempo após o fechamento da chave C, haverá corrente induzida na espira 2? Explique.
17. A figura deste exercício mostra uma espira condutora CDFG, colocada sobre uma mesa horizontal. Um ímã é afastado verticalmente da espira da maneira indicada na figura.
 - a) O campo magnético estabelecido pelo ímã em pontos do interior da espira está dirigido para baixo ou para cima?
 - b) O fluxo magnético através da espira está aumentando ou diminuindo?
 - c) Então, o campo magnético que a corrente induzida cria no interior da espira deve estar dirigido para baixo ou para cima?
 - d) Usando a regra de Ampère, determine o sentido da corrente induzida na espira.



Exercício 17.

24.4. O transformador

O QUE É UM TRANSFORMADOR

Em diversas instalações elétricas e até mesmo em nossas residências tem-se, muitas vezes, necessidade de aumentar ou diminuir a voltagem que é fornecida pelas companhias de eletricidade. O dispositivo que nos permite resolver este problema é denominado *transformador*.

O transformador é um aparelho bastante simples e está representado esquematicamente na fig. 24-19-a. É constituído de uma peça de ferro, denominada *núcleo do transformador*, em torno do qual são enroladas duas bobinas, da maneira mostrada na fig. 24-19-a. Em uma dessas bobinas é aplicada a voltagem V_1 que desejamos transformar, isto é, que desejamos aumentar ou diminuir. Esta bobina é denominada *enrolamento primário* (ou simplesmente primário) do transformador.

Como veremos dentro em pouco, após a transformação, a voltagem, apresentando um valor V_2 , será estabelecida nas extremidades da outra bobina, que é denominada *enrolamento secundário* (ou simplesmente secundário) do transformador. Nos diagramas de circuitos elétricos, um transformador é representado da maneira mostrada na fig. 24-19-b. Na fotografia da fig. 24-20 mostramos um transformador como esse, usado para experiências em laboratórios de ensino. Procure identificar, na fotografia, as partes do transformador que acabamos de descrever.

COMO FUNCIONA UM TRANSFORMADOR

Suponhamos que uma voltagem constante V_1 seja aplicada ao primário do transformador (por exemplo, ligando-se os extremos da bobina do primário aos pólos de uma bateria). Esta voltagem fará com que uma corrente contínua (constante) circule pelas espiras do primário. Então, um campo magnético será estabelecido no interior desta bobina, fazendo com que o núcleo de ferro seja imantado. As linhas de indução do campo magnético criado por esta imantação, no interior da peça de ferro, têm o aspecto mostrado na fig. 24-19. Como estas linhas estão passando através da bobina do secundário, teremos um fluxo magnético através das espiras desta bobina. Entretanto, como a corrente que está passando no primário, provocando a imantação do núcleo, é constante, o fluxo magnético através do secundário não sofrerá variações. Nestas condições, não haverá f.e.m. induzida nas espiras do secundário e a voltagem nos extremos desta bobina será nula, isto é, $V_2 = 0$.

Por outro lado, se a voltagem V_1 aplicada no primário for *alternada*, a corrente que percorrerá as espiras do primário será, também, alternada. Então, o campo magnético estabelecido no núcleo de ferro estará sofrendo flutuações sucessivas e, conseqüentemente, o fluxo magnético através do secundário estará aumentando e diminuindo periodicamente no decorrer do

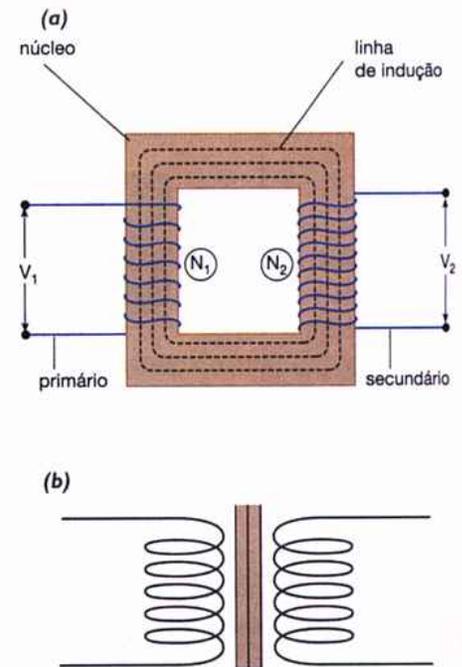


Fig. 24-19: Esquema de um transformador simples (a) e maneira de representá-lo em um diagrama de circuito elétrico (b).

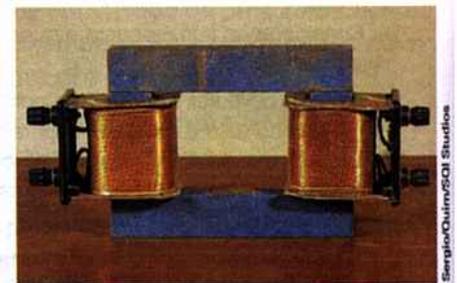


Fig. 24-20: Foto de um transformador simples usado em laboratórios de ensino.

tempo. Por este motivo, como sabemos, uma f.e.m. será induzida nas espiras do secundário, fazendo aparecer uma voltagem V_2 nos extremos desta bobina. Em resumo:

quando uma voltagem constante V_1 é aplicada ao primário de um transformador, o fluxo magnético através do secundário será também constante, não havendo, portanto, uma voltagem induzida nesta bobina. Quando a voltagem aplicada ao primário é alternada, um fluxo magnético variável atravessa as espiras do secundário e uma voltagem induzida V_2 aparece nos extremos desta bobina.

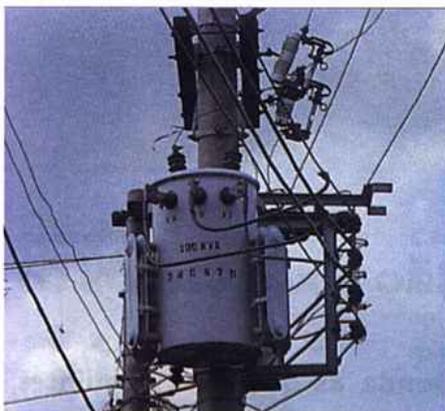


Foto de transformador usado nos postes de rua.

Agostinho de Paula

RELAÇÃO ENTRE AS VOLTAGENS NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO

Até agora descrevemos o transformador e seu funcionamento, mas ainda não mostramos por que ele pode ser usado para aumentar ou diminuir uma voltagem de corrente alternada. Para isto, designemos por N_1 o número de espiras no primário e por N_2 o número de espiras no secundário. A partir da lei de Faraday é possível demonstrar que a seguinte relação é válida:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Com esta expressão é fácil concluir que, se o número de espiras no secundário for maior do que no primário, isto é, se $N_2 > N_1$, teremos $V_2 > V_1$. Então, o transformador está sendo usado para elevar a voltagem. Por outro lado, se tivermos $N_2 < N_1$, teremos $V_2 < V_1$, ou seja, o transformador está sendo usado para diminuir a voltagem.

É importante observar que o transformador não pode criar energia. Portanto, quando um aparelho é ligado ao secundário durante um certo tempo, a energia que é fornecida ao aparelho não pode ser maior do que aquela fornecida ao primário. Em outras palavras, a potência obtida no secundário *não* pode ser superior à potência fornecida ao primário do transformador.



Na foto, vemos um tipo moderno de transformadores, montados sobre base de concreto, para evitar "fugas" de corrente elétrica para a Terra.

SPL/Stock Photos

Exemplo

Um transformador foi construído com um primário constituído por uma bobina de 400 espiras e um secundário com 2 000 espiras. Aplica-se ao primário uma voltagem alternada de 120 V.

a) Qual a voltagem que será obtida no secundário?

A voltagem, V_2 , no secundário poderá ser obtida através da relação $V_2/V_1 = N_2/N_1$. Como temos

$$V_1 = 120 \text{ V} \quad N_1 = 400 \quad N_2 = 2\,000$$

virá

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{ou} \quad \frac{V_2}{120} = \frac{2\,000}{400} \quad \text{donde} \quad V_2 = 600 \text{ V}$$

- b) Suponha que este transformador esteja sendo usado para alimentar uma lâmpada fluorescente ligada ao seu secundário. Sabendo-se que a corrente no primário vale $i_1 = 1,5 \text{ A}$, qual é o valor da corrente i_2 que passa pela lâmpada (suponha que não haja dissipação de energia no transformador)?

Como sabemos, a potência desenvolvida em um aparelho elétrico, que é percorrido por uma corrente i ao ser submetido a uma voltagem V , é dada por $P = Vi$. Então, a potência P_1 fornecida ao primário é $P_1 = V_1 i_1$ e a potência P_2 obtida no secundário (na lâmpada) é $P_2 = V_2 i_2$. Como não há dissipação de energia no transformador (transformador ideal), devemos ter $P_2 = P_1$. Logo:

$$V_2 i_2 = V_1 i_1 \quad \text{ou} \quad 600 i_2 = 120 \times 1,5 \quad \text{donde} \quad i_2 = 0,30 \text{ A}$$

Observe que, se o transformador está sendo usado para aumentar a voltagem, a corrente no secundário será forçosamente menor do que a corrente no primário. Evidentemente, o contrário ocorre com um transformador que abaixa a voltagem.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- | | |
|--|--|
| <p>18. Suponha que uma bateria de automóvel esteja ligada ao primário de um transformador.</p> <p>a) Haverá fluxo magnético através das espiras do secundário?</p> <p>b) Este fluxo será constante ou variável? Por quê?</p> <p>c) Então, existirá uma voltagem nas extremidades da bobina do secundário?</p> <p>19. O primário de um transformador é ligado à tomada elétrica de uma residência. Responda, para este caso, as questões formuladas no exercício anterior.</p> <p>20. No exemplo resolvido nesta seção, suponha que a</p> | <p>voltagem de 120 V tenha sido aplicada à bobina de 2 000 espiras.</p> <p>a) Neste caso, qual das bobinas é o primário do transformador? Qual é o secundário?</p> <p>b) Calcule a voltagem que aparecerá na bobina do secundário.</p> <p>21. Considerando a situação do exercício anterior, suponha que uma corrente $i_2 = 3,5 \text{ A}$ esteja passando em uma lâmpada ligada à bobina de 400 espiras. Orientando-se pela solução do exemplo resolvido nesta seção, determine a intensidade da corrente que está passando no primário do transformador.</p> |
|--|--|

24.5. Ondas eletromagnéticas

O trabalho mais notável desenvolvido no campo do Eletromagnetismo foi realizado na segunda metade do século XIX pelo célebre físico escocês James C. Maxwell. Apoiando-se nas leis experimentais descobertas por Coulomb, Ampère e Faraday e acrescentando a elas uma nova concepção criada por ele próprio, este

cientista estruturou um conjunto de equações, atualmente denominadas *equações de Maxwell*, que sintetizam todos os conhecimentos sobre Eletromagnetismo adquiridos até aquela época. Podemos dizer que as equações de Maxwell, no estudo da Eletricidade, desempenham o mesmo papel que as leis de Newton na Mecânica.

A consequência mais importante obtida através dessas equações foi a previsão da existência das *ondas eletromagnéticas*, atualmente muito conhecidas e amplamente empregadas na ciência e na tecnologia. Mostraremos a seguir, de maneira bastante simplificada, como Maxwell chegou a esta conclusão e como, mais tarde, suas idéias foram confirmadas experimentalmente.



James Clerk Maxwell (1831-1879).

Físico escocês, cuja importância no estudo da Eletricidade e do Magnetismo é comparada àquela que Newton teve na Mecânica, em virtude do caráter fundamental das leis que ele estabeleceu. Maxwell deu também contribuições importantes em outros campos da Física, tais como um estudo da percepção das cores pela nossa vista (produziu uma das primeiras fotografias coloridas) e uma teoria sobre os anéis de Saturno. Entretanto, foi no campo do Eletromagnetismo que seus trabalhos tiveram maior realce, devendo-se destacar a previsão da existência das ondas eletromagnéticas e um dos triunfos desta teoria, que foi o estabelecimento da natureza eletromagnética da luz.

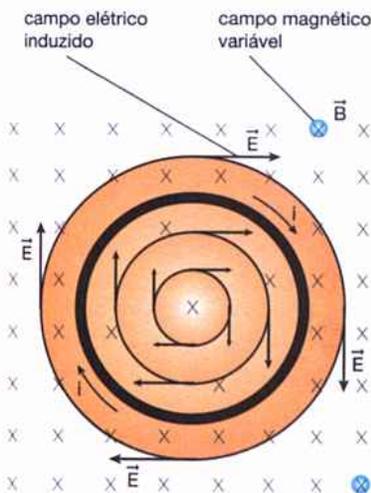


Fig. 24-21: Ilustração esquemática. Quando um campo magnético, existente em uma certa região, sofre variação no decorrer do tempo, aparece nesta região um campo elétrico induzido.

CAMPO ELÉTRICO INDUZIDO

Na fig. 24-21 mostramos uma espira metálica circular colocada em um campo magnético \vec{B} entrando na folha de papel. Provocando-se uma variação neste campo, o fluxo magnético através da espira variará e, como já sabemos, uma corrente induzida será estabelecida na espira, isto é, os elétrons livres existentes na espira, que estavam inicialmente em repouso, entrarão em movimento. Somos, portanto, levados a concluir que um *campo elétrico* atuou nestes elétrons, colocando-os em movimento e este campo elétrico só pode ter surgido graças à variação do campo magnético. Na fig. 24-21 estão mostradas algumas linhas de força deste campo elétrico, denominado *campo elétrico induzido*, criado pela variação do campo magnético.

Destacando a nossa conclusão, podemos dizer que:

se um campo magnético, existente em uma certa região do espaço, sofrer variação no decorrer do tempo, esta variação faz aparecer, nesta região, um campo elétrico induzido.

Este fato constitui um dos princípios básicos do Eletromagnetismo e fica claro, então, que um campo elétrico pode ser produzido não só por cargas elétricas em repouso (como aprendemos no capítulo 18), mas também por um campo magnético variável.

Observe que não é necessária a existência de uma espira metálica, como na fig. 24-21, para que o campo elétrico apareça. A espira simplesmente nos mostra que este campo realmente está presente, pois, se ele não existisse, não haveria corrente induzida na espira.

CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO

Analisando os fatos que acabamos de descrever, Maxwell teve a idéia de que, talvez, o fenômeno inverso fosse verdadeiro. Em outras palavras, lançou a hipótese de que *um campo elétrico variável pudesse dar origem a um campo magnético*.

Para esclarecer o significado desta idéia, consideremos duas placas metálicas, separadas de uma certa distância, no ar, ligadas a uma bateria, como mostra a fig. 24-22. Quando esta ligação é feita, a placa ligada ao pólo positivo da bateria vai adquirindo uma carga positiva, enquanto a outra placa vai se carregando negativamente. Como sabemos, as cargas nas placas criam um campo elétrico no espaço entre elas. À medida que o valor das cargas nas placas vai aumentando, a intensidade deste campo elétrico também cresce, isto é, temos entre as placas um campo elétrico variável no tempo. Nestas condições, segundo Maxwell, deverá aparecer na região entre as placas um campo magnético, denominado *campo magnético induzido*. Na fig. 24-22 estão mostradas algumas linhas do campo elétrico variável e do campo magnético induzido em virtude desta variação do campo elétrico.

Portanto, a hipótese de Maxwell nos diz que:

se um campo elétrico, existente em uma certa região do espaço, sofrer uma variação no decorrer do tempo, esta variação faz aparecer, nesta região, um campo magnético induzido.

Portanto, de acordo com as idéias lançadas por Maxwell, um campo magnético poderia ser produzido não só por uma corrente elétrica (cargas elétricas em movimento), como também por um campo elétrico variável.

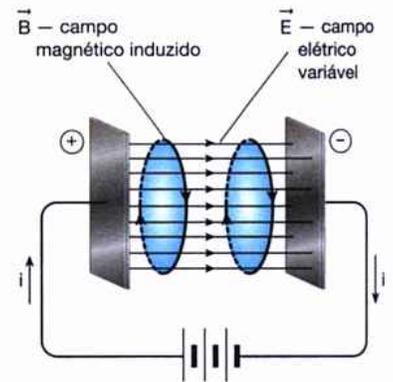


Fig. 24-22: Ilustração esquemática. Quando um campo elétrico, existente em uma certa região, sofre variação no decorrer do tempo, aparece nesta região um campo magnético induzido.

O QUE É UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA

A seguir examinaremos a conseqüência mais importante das idéias de Maxwell que, como dissemos, foi a previsão da existência das ondas eletromagnéticas.

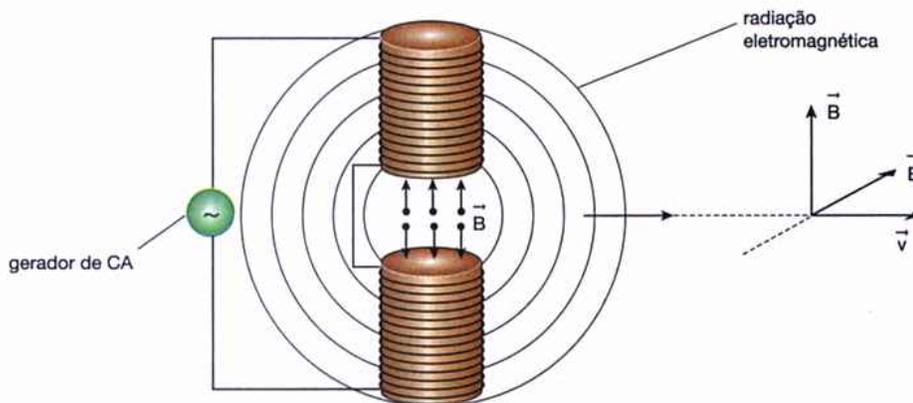


Fig. 24-23: Ilustração esquemática. A propagação, através do espaço, de um distúrbio constituído pelos campos variáveis \vec{E} e \vec{B} é denominada onda eletromagnética.

Suponha que em uma certa região do espaço exista um campo magnético \vec{B} variável no tempo. Considere, por exemplo, o campo entre os pólos de um eletroímã, cujas espiras são alimentadas por um gerador de corrente alternada (de alta freqüência), como mostra a fig. 24-23. Este campo \vec{B} , sendo gerado por

uma corrente alternada, será um campo oscilante, isto é, seu módulo e seu sentido variam periodicamente no decorrer do tempo. Então, como há variação do campo magnético, aparecerá nas vizinhanças do eletroímã um campo elétrico induzido \vec{E} . Este campo, por sua vez, estará variando no tempo e, de acordo com a hipótese de Maxwell, dará origem a um campo magnético induzido. Este campo magnético induzido, também variável, fará aparecer outro campo elétrico induzido e, assim, sucessivamente. Desta maneira, devemos ter a propagação, através do espaço, de um distúrbio constituído pelos campos variáveis \vec{E} e \vec{B} , que se irradia em todas as direções a partir do eletroímã. Na fig. 24-23 procuramos dar a idéia da irradiação destes campos, mostrando, também, os vetores \vec{E} e \vec{B} em um certo ponto e a velocidade \vec{v} com que eles se propagam através do espaço.

Maxwell mostrou, por meio de suas equações, que este distúrbio eletromagnético, ao se propagar, deveria apresentar todas as características de um movimento ondulatório. Portanto, de acordo com Maxwell, esta radiação eletromagnética deveria sofrer reflexão, refração, difração e interferência, exatamente como acontece com uma onda. Por este motivo, o distúrbio constituído pela propagação de campos elétricos e magnéticos foi denominado uma *onda eletromagnética*.

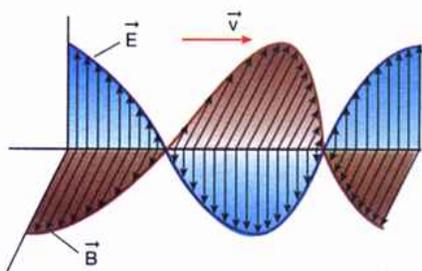


Fig. 24-24: Representação esquemática de onda eletromagnética propagando-se para a direita.

Na fig. 24-24 procuramos representar uma onda eletromagnética se propagando para a direita. Observe que ela é constituída pelos campos \vec{E} e \vec{B} que oscilam periodicamente, de maneira semelhante aos pontos de uma corda na qual se propaga uma onda mecânica. Como vemos na figura, os vetores \vec{E} e \vec{B} são perpendiculares entre si e ambos são perpendiculares à direção de propagação da onda.

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA

É importante salientar que, ao contrário das ondas mecânicas (como o som, por exemplo), que estudamos no capítulo 16, uma onda eletromagnética *não* necessita de um meio material para se propagar. Como um campo elétrico e um campo magnético podem ser estabelecidos mesmo em um espaço vazio, é claro que uma onda eletromagnética poderá se propagar no vácuo.

Um dos resultados de maior repercussão obtido por Maxwell, usando suas equações, foi a determinação do valor da velocidade de propagação de uma onda eletromagnética. Seus cálculos mostraram que, *no vácuo* (ou no ar), estas ondas deveriam se propagar com uma velocidade v cujo valor é:

$$v = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

A importância deste resultado se deve ao fato de que este valor coincide com a velocidade de propagação da luz no vácuo. Esta concordância levou Maxwell a suspeitar que a luz fosse uma onda eletromagnética. Como vimos no capítulo 16, os físicos do século XIX já haviam estabelecido que a luz é um fenômeno ondulatório. Entretanto, eles não sabiam responder, com segurança, de que tipo de onda se tratava, isto é, qual era a natureza da onda luminosa.

Atualmente, sabemos que a suspeita de Maxwell era verdadeira: *a luz é, realmente, uma onda eletromagnética*. O estabelecimento da natureza eletromagnética da luz é considerado um dos grandes triunfos da teoria de Maxwell, pois este fato veio unificar a Ótica e o Eletromagnetismo. Então, já que os fenômenos luminosos têm sua origem em fenômenos eletromagnéticos, a Ótica pode ser considerada um ramo do Eletromagnetismo e suas leis (como as leis da reflexão, refração, difração etc.) podem ser deduzidas a partir das equações de Maxwell.

Em virtude de sua morte prematura, em 1879, aos 48 anos de idade, Maxwell não chegou a ver suas idéias confirmadas. A existência das ondas eletromagnéticas só foi verificada experimentalmente no fim do século XIX, pelo físico alemão H. Hertz. Este cientista conseguiu obter, em seu laboratório, ondas eletromagnéticas (ondas hertzianas) com todas as propriedades previstas por Maxwell. As experiências de Hertz, além de confirmarem as hipóteses de Maxwell, contribuíram para estabelecer que a luz é, de fato, uma onda eletromagnética.

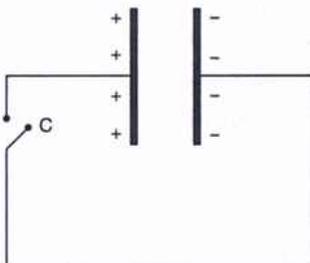
É, então, importante destacar que:

ao calcular a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética, no vácuo, Maxwell encontrou um resultado igual à velocidade da luz. Este fato levou-o a suspeitar que a luz fosse uma onda eletromagnética. As experiências de Hertz, e outras posteriores, mostraram que as idéias de Maxwell eram corretas.

Ícios de fixação **exErcÍcios de fixação** exErcÍcios de f

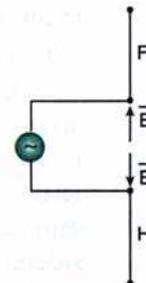
Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

22. Suponha que, na fig. 24-21, o módulo do campo magnético \vec{B} esteja aumentando no tempo. Nestas condições, responda:
- Haverá um campo elétrico induzido naquela região?
 - Usando a lei de Lenz, determine o sentido da corrente induzida na espira.
 - Então, qual é o sentido das linhas de força do campo elétrico induzido?
23. A figura deste exercício mostra duas placas metálicas carregadas com cargas de mesmo módulo, mas de sinais contrários. Considerando que a chave C permaneça aberta:
- Existe um campo elétrico no espaço entre as placas?
 - Este campo elétrico fará aparecer entre as placas um campo magnético induzido? Por quê?



Exercício 23.

24. Considere o circuito do exercício anterior logo após a chave C ter sido fechada.
- O valor da carga em cada placa está aumentando, diminuindo ou não está se alterando?
 - O módulo do campo elétrico entre as placas está aumentando, diminuindo ou não está se alterando?
 - Então, haverá um campo magnético induzido na região entre as placas?
25. Um gerador de voltagem alternada é ligado às extremidades F e H de uma antena metálica, como mostra a figura deste exercício. Em virtude disso, estabelece-se entre F e H um campo elétrico \vec{E} que oscila periodicamente no tempo.
- Haverá um campo magnético induzido nas proximidades da antena?
 - Por analogia com a fig. 24-23, dizer o que ocorre no espaço em torno desta antena.



Exercício 25.

26. Observando a fig. 24-24, diga se uma onda eletromagnética é uma onda transversal ou longitudinal.
27. Na fig. 24-24, suponha que a corrente que circula nas espiras do eletroímã esteja oscilando com uma frequência de 600 quilohertz. Lembrando-se de seus conhecimentos sobre ondas (capítulo 16), responda:
- Qual será a frequência f da onda eletromagnética que é irradiada?
 - Qual é a velocidade v com que esta onda se propaga?
 - Qual é a relação entre f , v e λ (comprimento de onda) para uma onda qualquer?
 - Qual é, então, o valor de λ da onda eletromagnética irradiada a partir do eletroímã?

As unificações das teorias físicas

Um fato de grande relevância para o desenvolvimento da Física foi analisado nesta seção: dois importantes ramos desta ciência, a Ótica e a Eletricidade, que eram estudados com base em princípios independentes, passaram a ser descritos a partir de uma única teoria, sintetizada pelas equações de Maxwell. Ocorreu, então, a *unificação* (ou a *síntese*) destes dois grandes campos da Física.

Em outros momentos da história da Física foram, também, observadas unificações tão importantes quanto essa e, ainda na atualidade, novas sínteses continuam a ser propostas e pesquisadas, buscando-se descrever o maior número possível de fenômenos naturais cada vez com um número menor de princípios fundamentais. Analisaremos, a seguir, de maneira sucinta, as grandes unificações que até hoje os físicos conseguiram estabelecer ao longo da evolução desta importante área de conhecimento.

A primeira grande unificação que citaremos, denominada *Síntese Newtoniana*, estabeleceu a universalidade das leis da Mecânica. Como vimos, a Física Aristotélica afirmava que as leis referentes aos movimentos dos corpos celestes eram diferentes daquelas que eram obedecidas pelos corpos na superfície da Terra. Ao publicar os *Principia*, Newton mostrou que as leis básicas por ele estabelecidas poderiam ser usadas para descrever os movimentos de quaisquer corpos (celestes ou terrestres).

No capítulo 22 tivemos oportunidade de estudar uma outra importante unificação: as experiências de Oersted, e estudos posteriores desenvolvidos por Ampère e Faraday, mostraram que os fenômenos elétricos e magnéticos tinham a mesma origem. A Eletricidade e o Magnetismo foram unificados, originando um novo campo de estudos mais abrangente, denominado Eletromagnetismo. Como citamos inicialmente, cerca de 50 anos depois os trabalhos de Maxwell tornariam o campo do Eletromagnetismo muito mais amplo, incorporando também a Ótica a esta área.

No início do século XX, após terem ocorrido as sínteses mencionadas, tudo parecia indicar que apenas dois tipos de força estavam presentes em qualquer fenômeno natural: a força de origem gravitacional e a força de origem eletromagnética. Durante grande parte de sua vida, Albert Einstein tentou estabelecer a unificação dessas forças, procurando uma teoria que pudesse descrevê-las com base em um mesmo princípio fundamental. A busca da Teoria do Campo Unificado, como ela foi denominada, até hoje não teve êxito, apesar de muitos cientistas da atualidade continuarem a realizar pesquisas neste sentido.

Com o desenvolvimento da Física Nuclear, os cientistas constataram a existência de dois outros tipos de força, que se manifestam somente entre partículas que constituem o núcleo atômico. Essas forças foram denomina-

das *força nuclear fraca* e *força nuclear forte*. A força nuclear fraca entre duas partículas é cerca de 100 000 vezes menor que a força eletromagnética que também se manifesta entre elas, mas seu alcance é muito pequeno, pois ela não atua quando as partículas se encontram separadas por distâncias superiores a 10^{-16} cm. Esta força se manifesta, praticamente, entre quaisquer tipos de partículas. Por outro lado, a força nuclear forte se manifesta apenas entre algumas partículas nucleares, mas seu alcance é consideravelmente maior, manifestando-se para distâncias de até 10^{-13} cm.

Modernamente, graças aos trabalhos liderados pelo físico paquistanês, radicado na Inglaterra, Abdus Salam, foi obtida uma grande vitória relacionada com a unificação das forças da natureza. Apesar de as tentativas de unificação das forças eletromagnéticas e gravitacionais terem fracassado, este cientista conseguiu estabelecer uma teoria na qual se chegava à síntese entre a força eletromagnética e força nuclear fraca. Essas idéias puderam ser comprovadas experimentalmente graças aos potentes aceleradores de partículas do CERN, aos quais nos referimos no capítulo 22. A importância do trabalho de Abdus Salam e sua repercussão na comunidade científica internacional foram tais que ele recebeu o Prêmio Nobel de Física, em 1979.

Outras tentativas para unificar as forças da natureza continuam sendo desenvolvidas e há indícios, segundo alguns pesquisadores, de que a unificação total possa ser alcançada dentro de algum tempo. A teoria responsável por essa unificação costuma ser conhecida pela sigla "TOE", do inglês *theory of everything*, isto é, "teoria de todas as coisas".

No quadro da fig. II, você poderá ter uma visão global das principais unificações ocorridas no campo da Física e que acabamos de abordar.

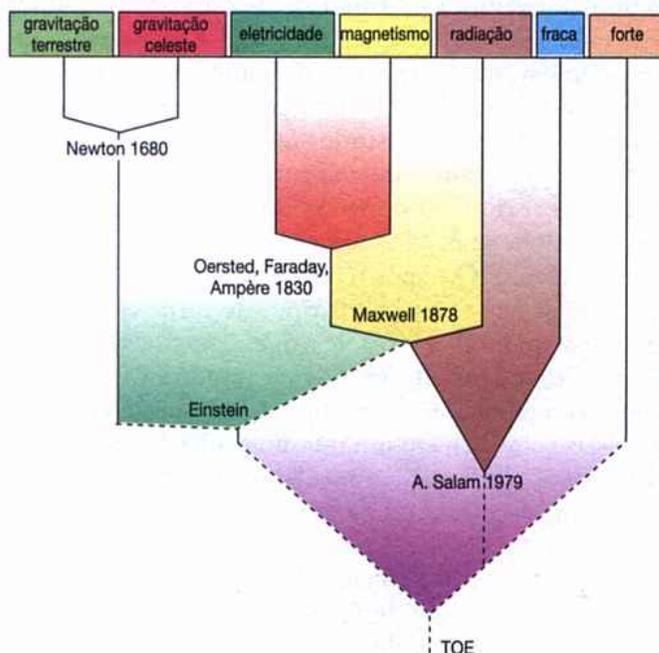


Fig. I: Faraday também deu sua contribuição na tentativa de unificação das forças elétrica e gravitacional.



Fig. II: Diagrama que mostra a história da unificação das teorias físicas. As linhas pontilhadas se referem a teorias ainda não estabelecidas definitivamente.

24.6. O espectro eletromagnético

O QUE É ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Desde a época de Maxwell até nossos dias, houve um grande progresso nos conhecimentos relacionados com as ondas eletromagnéticas. Assim, sabemos atualmente que existem vários tipos dessas ondas, as quais, apesar de serem todas de mesma natureza (constituídas pelos campos \vec{E} e \vec{B} que oscilam no tempo e se propagam no espaço), apresentam, às vezes, características bastante diferentes.

De um modo geral, os diversos tipos de ondas eletromagnéticas diferem pelo valor de sua frequência e, também, pela maneira como elas são produzidas, como descreveremos mais adiante. Na fig. 24-25 estão apresentados os diversos tipos de ondas eletromagnéticas que são conhecidas. Observe que, conforme o valor da frequência, elas recebem denominações especiais: ondas de rádio, infravermelho, raios X etc.

Fig. 24-25: Os diversos tipos de ondas eletromagnéticas conhecidas constituem o espectro eletromagnético (os limites dos intervalos mostrados não devem ser considerados com rigidez). Ilustração esquemática.

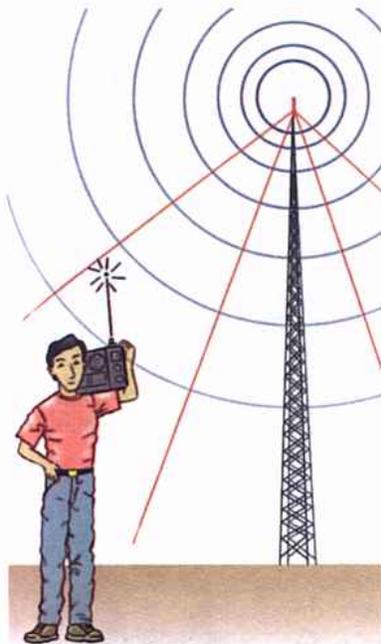
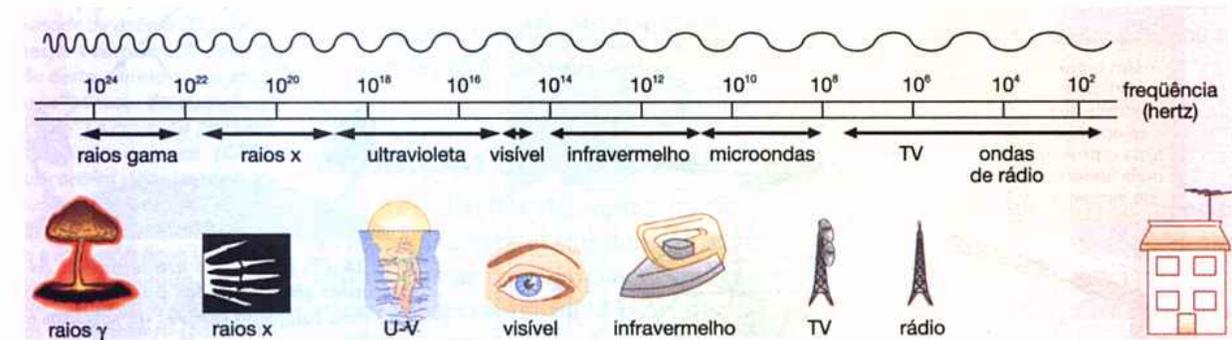


Fig. 24-26: Ilustração esquemática. As ondas de rádio são emitidas por elétrons acelerados na antena da emissora.

O conjunto de todos estes tipos de ondas é denominado *espectro eletromagnético*. Portanto, o que está representado na fig. 24-25 nada mais é do que o espectro eletromagnético. Todas as ondas que constituem este espectro propagam-se, no vácuo, com a mesma velocidade ($v = 3,0 \times 10^8$ m/s, como vimos) e podem ser originadas pela aceleração de uma carga elétrica. Então, sempre que uma carga elétrica é acelerada, ela irradia um certo tipo de onda eletromagnética, o qual irá depender do valor da aceleração da carga.

Examinaremos, a seguir, algumas características de cada tipo de onda que constitui o espectro eletromagnético.

ONDAS DE RÁDIO

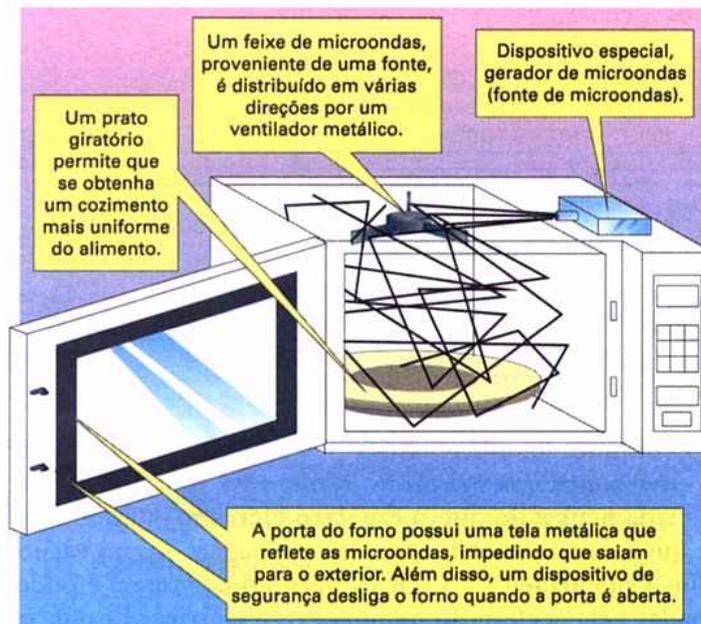
Vemos, na fig. 24-25, que as ondas eletromagnéticas que apresentam frequências mais baixas (até cerca de 10^8 hertz, ou seja, cem milhões de vibrações por segundo!) são as *ondas de rádio*. Elas recebem esta denominação porque são usadas pelas estações de rádio para realizar suas transmissões. Nestas estações existem circuitos elétricos especiais que provocam a oscilação de elétrons na antena emissora. Estes elétrons, portanto, estão sendo continuamente acelerados e, por isso, emitem as ondas de rádio que transportam as mensagens da estação (fig. 24-26).

As ondas eletromagnéticas usadas pelas emissoras de TV têm as mesmas características das ondas de rádio. Entretanto, como vemos na fig. 24-25, elas apresentam frequências mais elevadas do que aquelas normalmente usadas pelas estações de rádio.

MICROONDAS

Considerando frequências mais elevadas do que as ondas de rádio, encontramos ondas eletromagnéticas denominadas *microondas*. Estas ondas têm frequências compreendidas, aproximadamente, entre 10^8 hertz e 10^{11} hertz, como indica a fig. 24-25.

Atualmente as microondas são usadas amplamente, em quase todo o mundo, em telecomunicações, transportando sinais de TV via satélite ou transmissões telefônicas, ligando cidades e países (fig. 24-27).



O forno de microondas é atualmente muito usado para cozinhar e aquecer alimentos. Isso ocorre porque suas microondas são absorvidas pelas moléculas de água existentes nas substâncias. A absorção das microondas provoca aumento da agitação molecular, causando, então, elevação da temperatura do alimento. Recipientes de vidro, cerâmica e outros materiais, nos quais os alimentos estão contidos, não são aquecidos pelas microondas porque não as absorvem (não contêm moléculas de água). Observe, na figura esquemática, detalhes do funcionamento deste forno.

RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A região seguinte do espectro eletromagnético é constituída pelas *radiações infravermelhas*, que são ondas eletromagnéticas com frequências desde cerca de 10^{11} hertz até 10^{14} hertz (veja a fig. 24-25).

A radiação infravermelha é emitida em grande quantidade pelos átomos de um corpo aquecido, os quais se encontram em constante e intensa vibração. O calor que sentimos quando estamos próximos de um metal aquecido é, em grande parte, devido aos raios infravermelhos que são emitidos por este metal e absorvidos por nosso corpo. Este processo de transmissão de calor foi citado no capítulo 12 e denominado *radiação térmica*.



Antenas de transmissão e recepção de microondas de uma estação de comunicação por satélites.

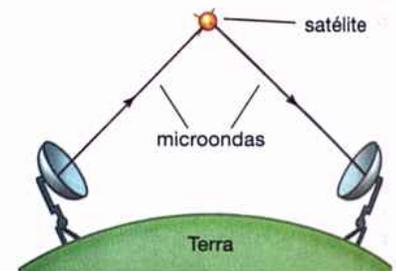
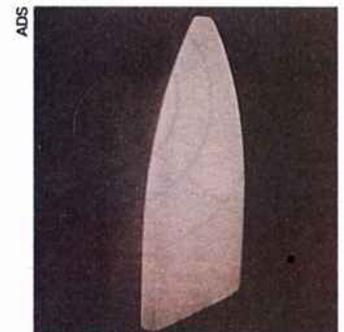


Fig. 24-27: Ilustração esquemática. As microondas são utilizadas para transmissões de TV ou telefonia através de satélites estacionários.



O ferro elétrico foi fotografado em uma sala totalmente escura, usando um filme sensível a radiações infravermelhas emitidas por ele.



Uma exposição freqüente ou de grande duração da pele humana a radiações ultravioleta pode dar origem a ulcerações cancerosas, como aquelas mostradas nesta fotografia. A luz solar contém uma quantidade apreciável dessas radiações que são, em grande parte, absorvidas pela camada de ozônio (O_3) da atmosfera terrestre. A destruição desta camada (que origina os "buracos da camada de ozônio") é causada por uma substância química (CFC), que contém cloro, usada principalmente em geladeiras, aparelhos de ar-condicionado e aerossóis (spray). O cloro do CFC é liberado quando este gás atinge as altas camadas da atmosfera (pela própria radiação ultravioleta), combinando-se então com o oxigênio da molécula de ozônio e destruindo-a. Esta destruição pode fazer com que o câncer de pele se torne um sério problema para todos nós. Em contrapartida, o fato de a radiação ultravioleta ser capaz de matar células vivas torna essa radiação útil no combate às bactérias. As lâmpadas de ultravioleta são, então, largamente empregadas para esterilizar dependências hospitalares, cozinhas de hotéis, restaurantes e até mesmo sistemas de ar-condicionado.



Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)

Físico alemão, descobriu os raios X, que também costumam ser chamados de raios Röntgen. Em 1895, lecionando na Universidade de Würzburg, ao realizar experiências com tubos de raios catódicos, percebeu a existência das radiações de natureza desconhecida que denominou raios X. Esta descoberta lhe valeu o Prêmio Nobel de Física em 1901.

RADIAÇÃO VISÍVEL

As ondas eletromagnéticas cujas freqüências estão compreendidas entre $4,6 \times 10^{14}$ hertz e $6,7 \times 10^{14}$ hertz constituem uma região do espectro eletromagnético de importância especial para nós. Estas radiações são capazes de estimular a visão humana; são as *radiações luminosas* (luz).

Observe, na fig. 24-25, que as radiações luminosas constituem uma faixa muito pequena do espectro eletromagnético. Portanto, nossos olhos não são capazes de perceber a grande maioria das radiações integrantes deste espectro.

Como vimos no capítulo 16, as menores freqüências das radiações visíveis nos dão a sensação de vermelho. Aumentando a freqüência das radiações, teremos, sucessivamente, as radiações correspondentes às cores laranja, amarelo, verde, azul, anil e, no final da região visível, a radiação violeta. Pode-se perceber, agora, que a denominação *infravermelho* foi usada porque as freqüências desta radiação estão situadas em uma faixa logo abaixo da freqüência correspondente à cor vermelha.

RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

As radiações eletromagnéticas com freqüências imediatamente superiores às da região visível são denominadas *radiações ultravioleta*. Esta denominação indica que as freqüências destas ondas são superiores à freqüência da luz violeta. Observe, na fig. 24-25, que a região ultravioleta alcança freqüências de até 10^{18} hertz.

Os raios ultravioleta são emitidos por átomos excitados como, por exemplo, em lâmpadas de vapor de Hg (acompanhando a emissão de luz). Como dissemos, estas radiações não são visíveis, podendo mesmo danificar os tecidos do olho humano. Elas podem ser detectadas por outros processos como, por exemplo, ao impressionarem certos tipos de chapas fotográficas.

RAIOS X

Este tipo de radiação é constituído pelas ondas eletromagnéticas de freqüências superiores às radiações ultravioleta (veja a fig. 24-25). Os raios X foram descobertos em 1895 pelo físico alemão W. Röntgen, que recebeu o Prêmio Nobel de Física, em 1901, por esta descoberta. A denominação *raios X* foi usada por Röntgen porque ele desconhecia a natureza das radiações que acabava de descobrir (raios X = raios desconhecidos).

Estes raios podem ser produzidos em tubos apropriados (ampolas de raios X), como aquele mostrado na fotografia da fig. 24-28-a. Nestes tubos, um feixe de elétrons é emitido pela placa *A*, indicada na fig. 24-28-b. Estes elétrons são acelerados por meio de uma voltagem elevada, existente entre a placa *A* e um alvo de tungstênio *B*. Ao atingirem este alvo, os elétrons são bruscamente retardados, isto é, sofrem uma desaceleração muito intensa. Em virtude disto eles emitem ondas eletromagnéticas de alta frequência, situadas na faixa correspondente aos raios X (veja a fig. 24-28-b).

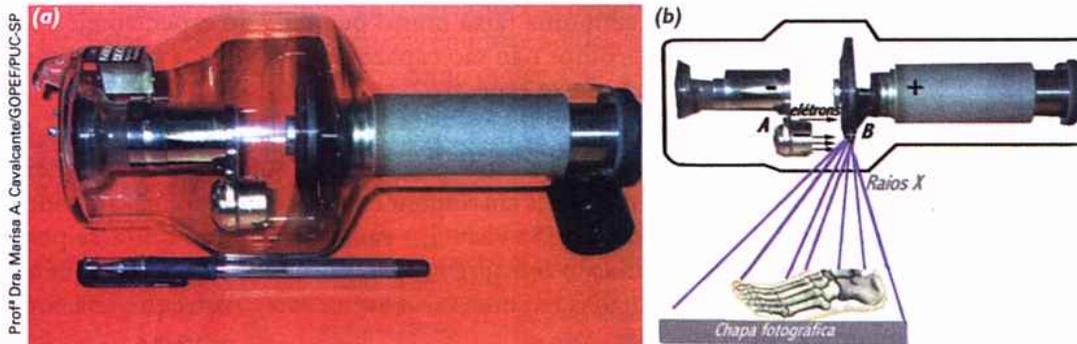


Fig. 24-28: A caneta na fotografia (à esquerda) serve de comparação para que se tenha uma idéia do tamanho da ampola.

Röntgen verificou que os raios X têm a propriedade de atravessar, com certa facilidade, os materiais de baixa densidade (como os músculos de uma pessoa) e de ser melhor absorvidos por materiais de densidade mais elevada (como os ossos do corpo humano). Em virtude desta propriedade, logo após a sua descoberta os raios X passaram a ser amplamente usados para se obter as radiografias (fig. 24-29). O próprio Röntgen foi o primeiro a fazer uso dessas radiações com esta finalidade, conseguindo obter a radiografia dos ossos da mão de uma pessoa.

Modernamente, os raios X encontram um campo muito vasto de aplicações além do seu emprego nas radiografias. Assim, eles são usados no tratamento do câncer (fig. 24-30), na pesquisa da estrutura cristalina dos sólidos, na indústria e em quase todos os campos da ciência e da tecnologia.



Fig. 24-29: Radiografias modernas como esta da fotografia à direita auxiliam os médicos no estudo e prevenção de várias anomalias dos ossos, como as lesões por esforço repetitivo.

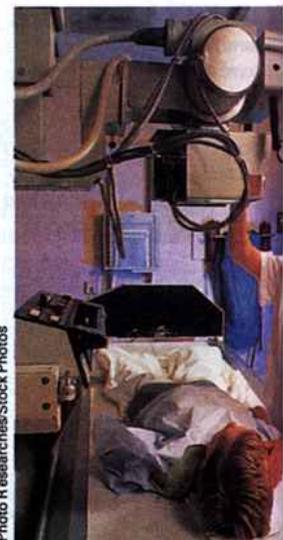
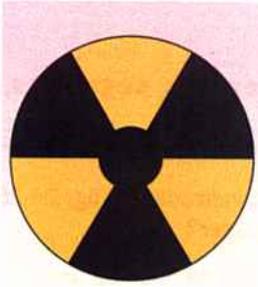


Fig. 24-30: Terapia com utilização dos raios X.

RAIOS GAMA (RAIOS γ)



Sinal usado internacionalmente para alertar as pessoas sobre radiações existentes nas proximidades, que podem constituir risco para os seres vivos.

Finalmente, vemos na fig. 24-25 que as ondas eletromagnéticas que apresentam as frequências mais altas conhecidas são os *raios gama*. Esta radiação é emitida pelos núcleos atômicos dos elementos quando eles se desintegram. Estes elementos, como você já deve ter ouvido falar, são denominados *elementos radioativos*.

Um núcleo atômico, ao se desintegrar, pode emitir até três tipos de radiações, que são denominadas α , β e γ . Fazendo estas radiações passar dentro de um campo elétrico, como mostra a fig. 24-31, verifica-se que elas se separam. Os raios α desviam-se para um lado (são partículas positivas), os raios β desviam-se para o outro (são partículas negativas) e os raios γ não sofrem desvio, pois não são partículas eletrizadas e sim ondas eletromagnéticas de alta frequência.

Os raios γ (do mesmo modo que os raios X) podem causar danos irreparáveis às células animais. Na explosão de uma arma nuclear (uma bomba atômica, por exemplo) há uma enorme emissão destas radiações, sendo este um dos motivos do grande perigo que tal tipo de arma representa para a humanidade. Os cientistas e técnicos que trabalham em laboratórios onde existem radiações γ (ou raios X) são obrigados a se protegerem contra doses excessivas destas radiações.

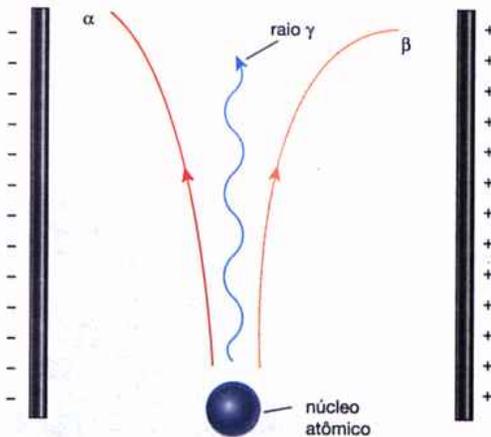
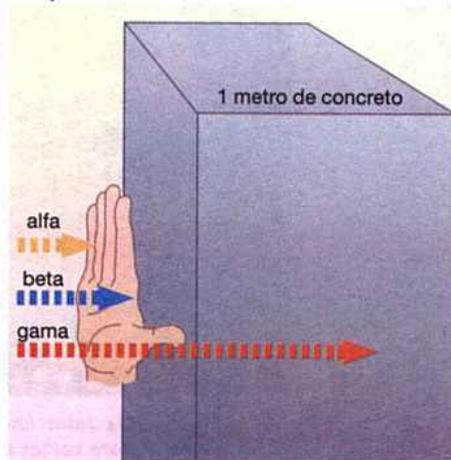
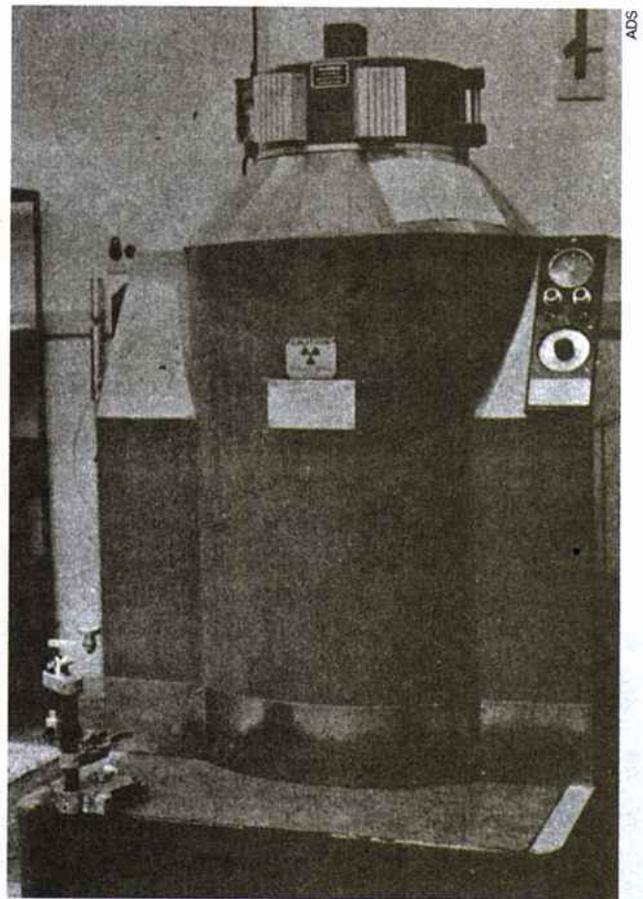


Fig. 24-31: Representação esquemática das radiações α , β e γ separadas pela ação de um campo elétrico.



A figura ilustra o poder de penetração das radiações α , β e γ . Observe que as radiações γ são muito mais penetrantes que as outras duas.



Célula de raios γ na qual esta radiação é emitida por um isótopo radioativo de cobalto, existente no interior do aparelho. A região onde está o cobalto é separada do exterior por uma parede protetora de chumbo, para evitar danos às pessoas que trabalham com o aparelho. A célula é utilizada para irradiar amostras de substâncias com objetivo tecnológico ou de pesquisa.

CÍCIOS de fIXAÇÃO **exeRCÍCIOS de fIXAÇÃO** exeRCÍCIOS de fIXAÇÃO

Antes de passar ao estudo da próxima secção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar necessário.

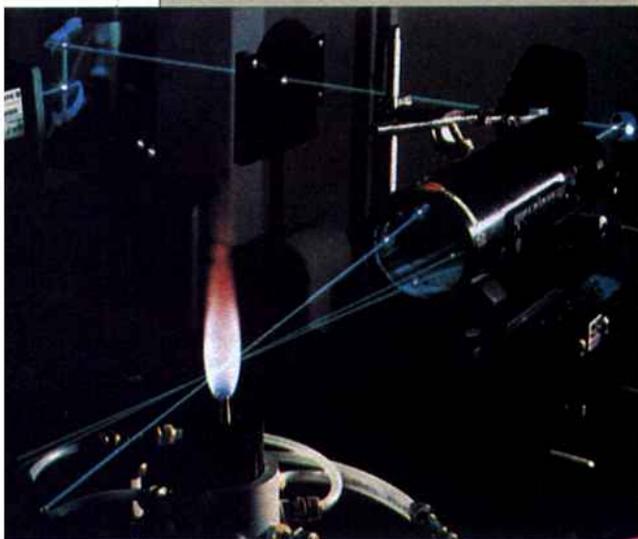
28. Coloque em ordem crescente de suas freqüências as seguintes radiações eletromagnéticas: raios X, ultravioleta, raios γ , microondas, ondas de rádio e luz azul.
29. Considere um feixe de microondas e um feixe de luz verde, ambos propagando-se no vácuo.
 - a) A velocidade de propagação das microondas é maior, menor ou igual à luz verde?
 - b) O comprimento de onda da microonda é maior, menor ou igual ao da luz verde?
30. Você já deve ter ouvido falar dos raios *laser*. Sabe-se que estas radiações são ondas eletromagnéticas cujas freqüências se situam entre $4,6 \times 10^{14}$ hertz e $6,7 \times 10^{14}$ hertz. Então, em qual dos tipos de ondas eletromagnéticas, indicadas na fig. 24-25, você classificaria os raios *laser*?
31. Medindo-se o comprimento de onda de uma radiação eletromagnética, propagando-se no vácuo, encontrou-se o valor $\lambda = 7,5 \times 10^{-9}$ m. Determine que tipo de onda eletromagnética constitui esta radiação.
32. Certamente, você já observou que, em uma radiografia, os ossos aparecem claros, sobre um fundo escuro. Então, lembrando-se do que foi dito no texto sobre os raios X, responda: em uma chapa de radiografia, a quantidade de raios X que incidiu nas regiões claras é maior ou menor do que a quantidade que incidiu sobre as regiões escuras?

Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação — Laser

O que é um raio *laser*

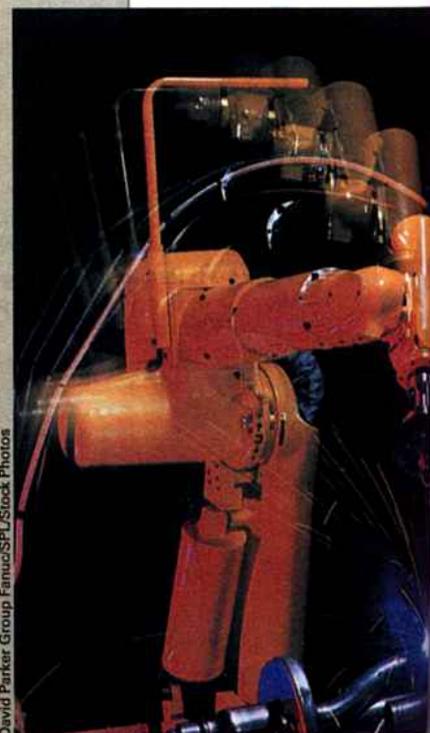
— O *laser* é um tipo especial de radiação eletromagnética visível, cujas aplicações tecnológicas e científicas vêm crescendo dia a dia.

O termo *laser* é constituído pelas iniciais das seguintes palavras inglesas: *light amplification by stimulated emission of radiation*, que significam “amplificação da luz por emissão estimulada de radiação”. Um feixe de raios *laser* distingue-se da luz comum por apresentar algumas características próprias, que analisaremos a seguir.



D.S. Dept. of Energy/SPL/Stock Photos

Os feixes de raios *laser* mostrados na foto estão sendo usados para analisar a chama proveniente da queima de uma substância combustível. Este estudo conduzirá à fabricação de motores de combustão mais eficientes e que não sejam tão poluentes como os atuais.



David Parker Group/Fanuc/SPL/Stock Photos

Os raios *laser* são usados para cortar e soldar metais e, também, para cortar papel e tecidos.

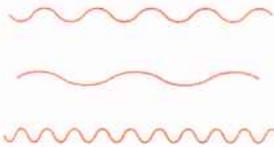


Fig. I: A luz comum é constituída por uma mistura de radiações de diversas frequências.

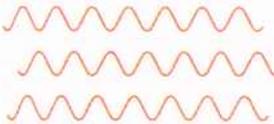


Fig. II: A luz comum, mesmo quando é monocromática, apresenta-se incoerente.

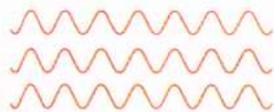


Fig. III: A luz do laser é coerente.

— O feixe de *laser* apresenta-se sempre com intensidade muito elevada, isto é, há grande concentração de energia em áreas muito pequenas (feixes muito finos). Por exemplo, um *laser* de potência baixa, em torno de alguns miliwatts, apresenta brilho considerável, muito superior ao da luz emitida por uma lâmpada de 60 watts. Além disso, este intenso feixe é constituído de raios praticamente paralelos, que podem se propagar por distâncias muito grandes sem se dispersar (os raios se mantêm quase paralelos, com divergência muito baixa).

— A luz do *laser* é monocromática, isto é, ela é constituída de radiações que apresentam uma única frequência, de valor bem determinado. Com a luz comum seria muito difícil obter esse grau de monocromaticidade, pois ela se apresenta como uma mistura de radiações de várias frequências (veja a fig. I).

— A luz de um feixe de *laser* é coerente, enquanto um feixe de luz comum é incoerente. Esta denominação indica que, na luz comum, as cristas e os vales das ondas luminosas se distribuem aleatoriamente uns em relação aos outros, isto é, estão defasadas entre si, como mostra a fig. II, e esta defasagem não permanece constante no decorrer do tempo.

Por outro lado, as diversas radiações que constituem um feixe de *laser* estão rigorosamente em fase, havendo coincidência entre as cristas e, conseqüentemente, entre os vales como mostra a fig. III. Dizemos, então, que a luz do *laser* é coerente.

— A expressão “emissão estimulada”, que aparece no termo *laser*, indica uma maneira incomum pela qual um átomo emite radiação. Normalmente, esta emissão é feita por um processo denominado emissão espontânea, representada na fig. IV-a: um elétron, que foi transferido para um nível de energia mais elevado em um átomo, tende naturalmente a voltar para um nível de energia mais baixo (mais estável). A energia perdida pelo elétron, nesta transição, é irradiada sob a forma de um pulso de luz, denominado fóton. Na fig. IV-b, o elétron é induzido a sofrer a transição pela passagem de um fóton no interior do átomo. Como conseqüência desta transição, há emissão de um fóton, exatamente em fase com o fóton incidente. Dizemos que esta é uma emissão estimulada de radiação e, como resultado, dois fótons em fase abandonam o átomo. Em uma substância que está emitindo um *laser*, este processo ocorre com um número enorme de átomos, que foram previamente excitados. Por exemplo, mesmo em um *laser* de baixa potência temos a emissão de, no mínimo, 10^{15} fótons por segundo.

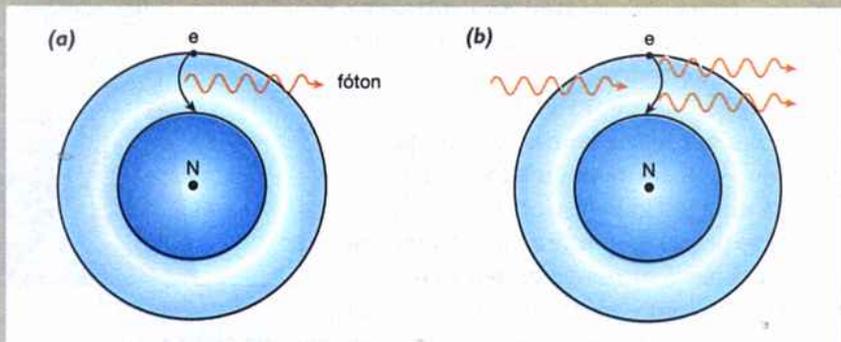


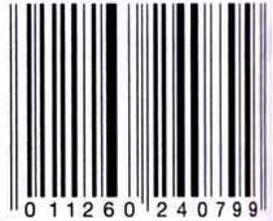
Fig. IV: Ilustração esquemática. Em (a) o átomo emite espontaneamente um fóton. Em (b) temos a emissão estimulada de radiação (dois fótons em fase deixam o átomo).

Aplicações do laser

São inúmeras as aplicações dos raios *laser* em diversos setores da ciência, da tecnologia e de nosso cotidiano. Entre elas podemos citar:

- leitura do código universal de produtos, para conferir preços de mercadorias em supermercados;
- em telecomunicações, utilizando cabo de fibra ótica, para transportar sinais de TV e telefone;
- para soldar e cortar metais;
- para medir, com precisão, distâncias muito grandes como, por exemplo, a distância da Terra à Lua;
- para furar orifícios muito pequenos e bem definidos, em substâncias duras;
- em CDs e vídeo-discos, para reprodução com altíssima fidelidade e sem ruídos de sons e imagens;
- na holografia, para obtenção de fotografias tridimensionais de um objeto (hologramas);
- na medicina, em cirurgias para substituição de bisturis, na endoscopia (como foi mencionado no capítulo 15) e para soldar retinas descoladas.

As aplicações do *laser* vêm se tornando tão amplas e diversificadas que seria praticamente impossível relacionar todas elas.



Este diagrama representa, por meio de um código de barras, o preço de uma mercadoria. Sua leitura é feita com um aparelho que emite raios laser.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

24.7. Transmissão e distribuição de energia elétrica

USINAS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Sabemos que a energia elétrica utilizada em nossas casas, nas indústrias etc. chega até nós por meio de uma corrente alternada. Esta corrente é produzida nas grandes centrais elétricas por geradores que funcionam de maneira semelhante àquele mostrado na fig. 24-13 e que foi analisado na seção 24.2.

Estes geradores nada mais são do que dispositivos que transformam uma forma qualquer de energia em energia elétrica. Em uma usina hidrelétrica, por exemplo, a energia mecânica da queda-d'água é aproveitada para colocar o gerador em rotação e, portanto, nestas usinas, temos a transformação de energia mecânica em energia elétrica (fig. 24-32). Nas usinas termoelétricas, o gerador é acionado pelo vapor d'água que sai de

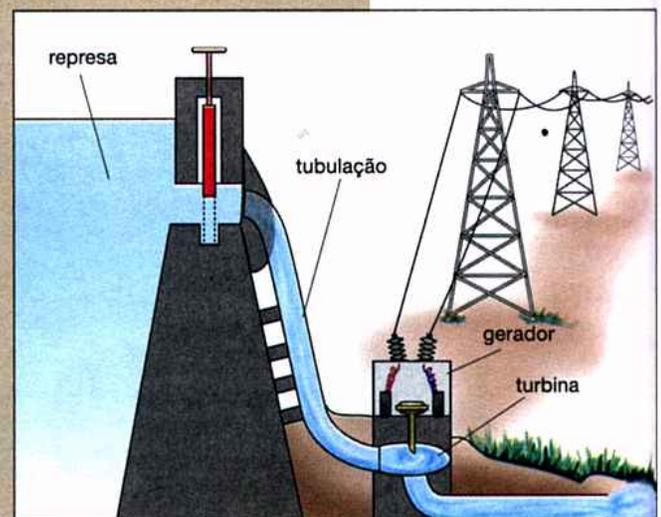


Fig. 24-32: Ilustração esquemática. Na usina hidrelétrica a energia mecânica da queda-d'água se transforma em energia elétrica.

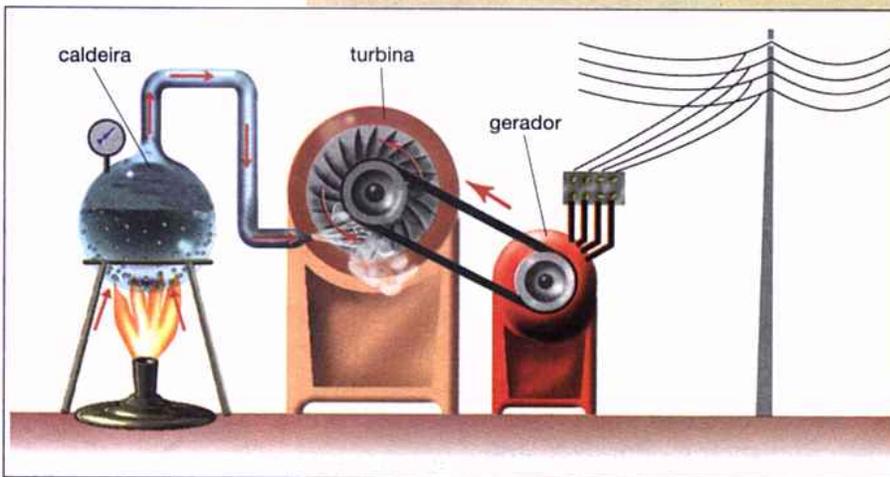
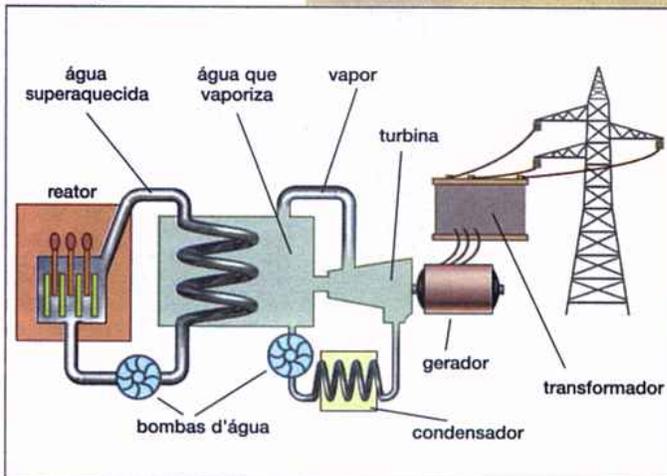


Fig. 24-33: Ilustração esquemática. Na usina termoeletrica a energia térmica do combustível é utilizada para produzir energia elétrica.

gerador é obtido por meio de reações nucleares que se desenvolvem em um reator atômico. Portanto, nestas usinas, temos a transformação de energia nuclear em energia elétrica.



Esquema de funcionamento de uma usina nuclear. A grande quantidade de calor liberado nas reações nucleares que ocorrem no reator provoca o superaquecimento da água que nele circula. Esta água é usada para produzir o vapor que vai acionar as turbinas. Observe que a água superaquecida, que circula no reator, é mantida em circuito isolado, sem contato direto com qualquer outra parte do conjunto, para evitar contaminação radioativa.

POR QUE A TRANSMISSÃO DA ENERGIA ELÉTRICA É FEITA COM ALTA VOLTAGEM

Qualquer que seja o tipo de usina escolhido para produção de energia elétrica, em qualquer parte do mundo, ela será sempre construída para gerar corrente alternada. Procuraremos mostrar, a seguir, o motivo desta escolha, isto é, por que não se usa a corrente contínua para distribuir a energia elétrica produzida nas grandes usinas de qualquer país.

O motivo preponderante desta escolha está relacionado com as perdas de energia, por efeito Joule, que ocorrem nos fios que transportam a corrente elétrica a longas distâncias. Para analisar este fato, consideremos a fig. 24-34, na qual vemos um gerador produzindo corrente elétrica, que é transportada pelos fios AC e BD, para ser utilizada na rede elétrica de uma residência. Sendo V_{AB} a voltagem entre os pólos do gerador e i a corrente nos fios, a potência fornecida pelo gerador é $P_1 = iV_{AB}$. Mas, sendo r a resistência total dos fios transportadores, a potência desenvolvida nestes fios sob a forma de

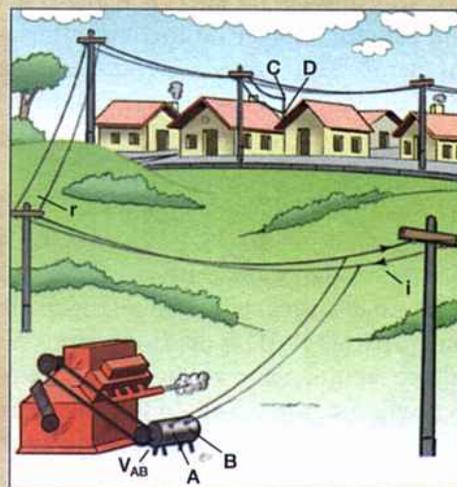


Fig. 24-34: A potência fornecida pelo gerador é em parte dissipada nos fios que conduzem a corrente até o local onde ela será utilizada.

calor (efeito Joule) será $P_2 = ri^2$. Assim, a potência P , que é recebida na resistência, será

$$P = P_1 - P_2 \quad \text{ou} \quad P = iV_{AB} - ri^2$$

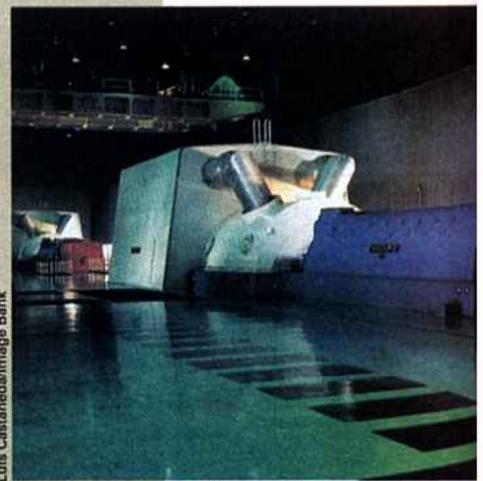
É evidente que a perda por efeito Joule nos fios ($P_2 = ri^2$) deve ser a menor possível. Para isto, deveríamos procurar diminuir os valores de r e de i . O valor de r só pode ser diminuído se for aumentada a área da secção reta dos fios, isto é, usando-se fios mais grossos. Entretanto, existe um limite para este procedimento, pois cabos muito grossos, além de terem custo elevado, tornariam a rede de transmissão extremamente pesada. Assim, a solução mais adequada é procurar reduzir o valor da corrente i a ser transmitida. Como a potência $P_1 = iV_{AB}$, fornecida pelo gerador, não pode sofrer alteração, se o valor de i for reduzido, teremos de aumentar o valor de V_{AB} de modo a manter inalterado o valor desta potência. Concluímos assim que, para reduzir as perdas por aquecimento nos fios transportadores, a energia elétrica deve ser transmitida com baixa corrente e alta voltagem.

Esta é exatamente a solução adotada pelos engenheiros eletricitistas ao projetarem as linhas de transmissão. O valor da alta voltagem em cada caso depende da potência a ser transmitida e da distância entre a usina e o local de consumo. Assim, são usadas voltagens de 100 000 V, 250 000 V, 480 000 V etc. e, atualmente, já são projetadas transmissões com até 1 000 000 V. Não é possível, entretanto, elevar indefinidamente o valor destas altas voltagens, porque acima de certos valores o ar em volta do fio torna-se condutor, permitindo o escoamento de eletricidade, o que constituiria uma outra forma de perda de potência.

A VOLTAGEM ALTERNADA PODE SER FACILMENTE ELEVADA OU REDUZIDA

As altas voltagens necessárias para a transmissão de energia elétrica não podem ser fornecidas diretamente por um gerador, seja ele de corrente alternada, seja de corrente contínua. De fato, os maiores geradores das grandes usinas fornecem voltagens em torno de 10 000 V. Então, torna-se necessário, para a transmissão, elevar consideravelmente os valores das voltagens fornecidas pelos geradores.

Se o gerador fosse de corrente contínua, não haveria condições de resolver este problema, pois, conforme estudamos na secção 24.4, um *elevador de voltagem*, isto é, um transformador, *não funciona* com corrente contínua. Por outro lado, se o gerador for de corrente alternada, será relativamente fácil elevar a voltagem produzida usando-se aquele aparelho. Além disso, devemos nos lembrar de que, ao chegar nos centros de consumo, a alta voltagem deverá ser reduzida antes de ser distribuída. Evidentemente, seria fora de propósito um consumidor receber em sua casa voltagens de valores tão elevados como aqueles da transmissão. Com a escolha de corrente alternada, este problema também é facilmente resolvido com um transformador, que passa agora a reduzir os valores da alta voltagem.



Turbinas que são acionadas por vapor a alta pressão de uma usina termoeleétrica ou nuclear.

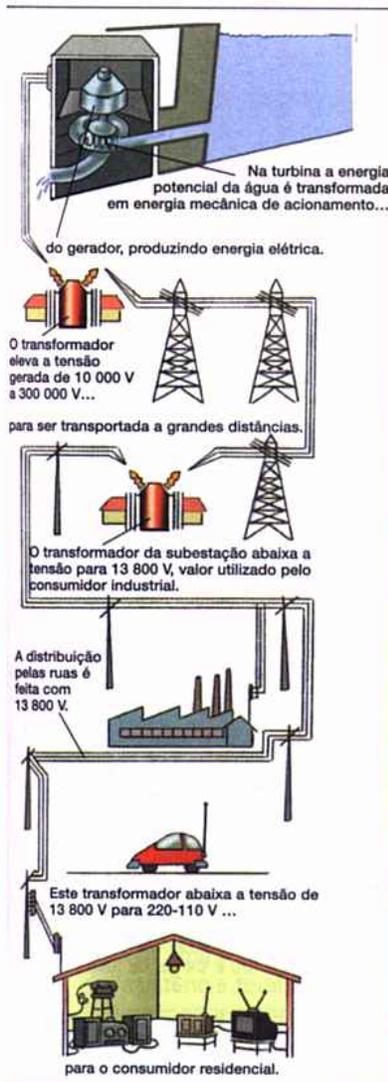


Fig. 24-35: Ilustração esquemática. Enquanto a energia elétrica é transportada desde a usina até as residências ela sofre várias alterações em sua voltagem.

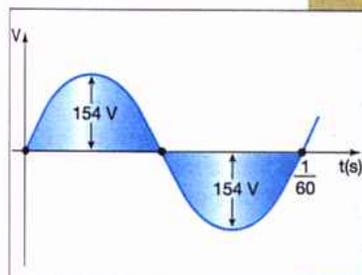


Fig. 24-36: Diagrama mostrando a variação da voltagem da corrente alternada com o tempo.

Esta facilidade de elevar ou reduzir uma voltagem alternada é o fator preponderante que levou os engenheiros a darem preferência aos sistemas de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica por meio de corrente alternada.

A UTILIDADE DO TRANSFORMADOR NA TRANSMISSÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

Na fig. 24-35 apresentamos um esquema da distribuição de energia elétrica, mostrando as sucessivas transformações de voltagem que ocorrem desde a geração na usina até sua utilização pelo consumidor.

Observe que logo após a voltagem alternada ser produzida em um gerador (com cerca de 10 000 V), o seu valor é elevado (para 300 000 V, por exemplo) por meio de transformadores existentes na subestação próxima à usina. Com esta alta voltagem, a energia elétrica é transportada a longas distâncias até chegar no centro consumidor (uma cidade, por exemplo), nas proximidades do qual se localiza uma outra subestação. Neste local, os transformadores reduzem a voltagem para valores (cerca de 13 000 V) com os quais ela é distribuída aos consumidores industriais e pelas ruas da cidade. Finalmente, nas proximidades das residências existem transformadores (nos postes da rua) que reduzem ainda mais a voltagem (para 110 V ou 220 V), de modo que ela possa ser utilizada, sem riscos, pelo consumidor residencial.

VOLTAGEM DE PICO E VOLTAGEM EFICAZ

Portanto, a voltagem que recebemos em nossas residências, proveniente do transformador de rua, é uma voltagem alternada, isto é, o seu sentido é invertido periodicamente, como mostra o gráfico da fig. 24-36. Como já dissemos, estas inversões de sentido são muito rápidas, pois a sua frequência é de 60 hertz, isto é, a voltagem muda de sentido 120 vezes por segundo.

Vemos, pelo gráfico, que a voltagem não é constante, como acontece com uma corrente contínua. O seu valor varia rapidamente: passa por um valor máximo, decresce, chega a zero, inverte de sentido, atinge um valor igual ao valor máximo, porém em sentido contrário, torna a se anular e assim sucessivamente.

O valor máximo atingido pela voltagem alternada é denominado valor de pico (para o caso mostrado na fig. 24-36, este valor é de 154 V). Entretanto, quando fornecemos o valor de uma voltagem alternada, estamos normalmente nos referindo não à *voltagem de pico*, mas a uma quantidade denominada *valor eficaz da voltagem*. Este valor eficaz seria o valor de uma voltagem constante (contínua) que dissipasse, durante o tempo de um período, em uma resistência R , a mesma energia térmica que é dissipada em R pela voltagem alternada, durante o mesmo intervalo de tempo. Pode-se mostrar que entre a voltagem eficaz e a voltagem de pico existe a seguinte relação:

$$V(\text{eficaz}) = \frac{V(\text{de pico})}{\sqrt{2}}$$

tida. Ao chegar ao local de consumo, a corrente contínua deve ser transformada novamente em corrente alternada para que sua voltagem possa ser reduzida antes de ser distribuída. É claro que todas estas operações implicam custos, de modo que apenas para transmissões a longas distâncias as economias feitas com os cabos poderão compensar estes custos. Em países de grandes dimensões, como a Rússia, os Estados Unidos e o Brasil, essas condições são fáceis de ocorrer e, por isso mesmo, o sistema de transmissão com corrente contínua já se encontra em implantação nestes países.

Is de fixação **exerCÍcios de fixação** exerCÍcios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

33. a) Quais as formas de energia que são usadas para se obter energia elétrica nas usinas mencionadas no início desta seção?
 b) Cite outras fontes de energia também usadas para a obtenção de energia elétrica em usinas semelhantes às referidas em (a). Descreva resumidamente como funciona cada uma dessas usinas.
34. Na fig. 24-34, suponha que a pequena usina elétrica esteja gerando uma potência $P_1 = 2\,400\text{ W}$, com uma voltagem $V_{AB} = 120\text{ V}$, sendo $r = 3,0\ \Omega$ a resistência total dos cabos AC e BD usados para transportar a energia até a residência.
- a) Qual a corrente que está sendo conduzida pelos cabos de transmissão?
 b) Qual a potência que está sendo dissipada, por efeito Joule, nestes cabos?
 c) Qual é a porcentagem da energia gerada que é dissipada na transmissão?
 d) Qual é a potência elétrica que está sendo entregue à residência?
35. Percebendo que a dissipação de energia na transmissão, analisada no exercício anterior, era muito elevada, o proprietário da residência tomou a seguinte medida: como o gerador era de CA (corrente alternada), instalou um transformador na saída do gerador, elevando a voltagem de 120 V para 600 V e outro transformador foi instalado na entrada da residência, reduzindo a voltagem novamente para 120 V. Supondo que a usina estivesse gerando a mesma potência $P_1 = 2\,400\text{ W}$, responda às questões do exercício anterior, nessa nova situação.
36. a) No exercício anterior, se o gerador da usina fosse de corrente contínua, seria possível reduzir as perdas usando a mesma solução ali apresentada? Por quê?
 b) Faça uma pesquisa em lojas especializadas para obter o custo aproximado da solução do problema dada pelo proprietário. Procure saber o preço de 1 kWh de energia elétrica na região onde você mora e calcule quanto tempo, aproximadamente, seria necessário para que a economia de energia fosse equivalente ao gasto feito naquelas instalações.
37. a) Provavelmente você já ouviu dizer que as transmissões de energia elétrica são feitas sob alta tensão. Explique o significado desta expressão e justifique sucintamente este procedimento.
 b) Então, qual é o fator preponderante que leva a corrente alternada a ser adotada nessas transmissões?
38. Observe a fig. 24-35, que mostra as diversas fases de produção, transmissão e distribuição da energia elétrica, e responda:
- a) Quantas vezes o valor da voltagem foi alterado por meio de transformadores?
 b) Diga onde estão localizados esses transformadores, informando, em cada caso, se ele é usado para elevar ou reduzir a voltagem.
 c) Em cada caso mencionado em (b), diga se o valor da corrente na transmissão aumenta, diminui ou não se altera.
39. É um fato conhecido que em diversas cidades (como em Brasília, por exemplo) o valor da voltagem fornecida às residências é de 220 V.
- a) Como se denomina esse valor, que é usado para caracterizar a voltagem alternada?
 b) Qual é o significado do valor referido em (a)?
 c) Qual é o valor da voltagem de pico em Brasília?

40. Suponha que uma resistência $R = 440 \Omega$ fosse ligada na tomada de uma residência em Brasília. Esta resistência, evidentemente, será percorrida por uma corrente alternada.
- Qual é o valor de pico da corrente em R ?
 - Qual é o valor eficaz desta corrente?
 - Qual a quantidade de calor dissipada em R , durante 10 s?
41. Em alguns países, a transmissão de energia elétrica por corrente contínua já vem sendo usada.
- Quais as vantagens que justificam este tipo de transmissão, substituindo a corrente alternada?
 - Então, por que a corrente contínua não é empregada em todas as linhas de transmissão?
42. Considere um sistema de transmissão de energia elétrica por corrente contínua.
- O gerador da usina deve ser de CC (corrente contínua) ou de CA (corrente alternada)?
 - Há necessidade de se elevar a voltagem antes da transmissão?
 - Em que momento deve ser feita a retificação da corrente?
 - Por que a corrente deve ser convertida em alternada antes da distribuição?

UMA ATIVIDADE INTERESSANTE

Em uma tomada de 110 V de nossas residências encontramos sempre dois pontos de ligação: um deles é ligado ao fio neutro e o outro a um fio de fase. Procure identificar cada um destes pontos, usando dispositivos especiais que você pode adquirir em lojas de material elétrico (por exemplo, uma chave de fenda com uma pequena lâmpada especial). Faça uma pesquisa (consulte técnicos ou livros especializados) para explicar o funcionamento do dispositivo que você usou e as características do neutro e da fase que conduzem àquele comportamento.

ão reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão re

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Explique com suas próprias palavras por que houve separação de cargas na barra CD da fig. 24-3.
 - Como se denomina a f.e.m. que aparece na barra devido a esta separação de cargas?
- Descreva como devemos proceder para que a corrente induzida, na fig. 24-5, seja alternada.
- Escreva a expressão matemática que define o fluxo magnético Φ através de uma superfície, explicando o significado de cada símbolo que aparece nesta expressão.
 - Qual é a unidade de fluxo magnético no S.I.?
 - Qual a relação entre o número de linhas de indução que furam uma superfície e o valor do fluxo magnético através dela?
 - Descreva três maneiras de fazer variar o fluxo magnético através de um circuito elétrico.
- Enuncie e expresse matematicamente a lei de Faraday da Indução Eletromagnética.
- Usando a lei de Faraday, explique por que aparece uma f.e.m. induzida na espira da fig. 24-7.
 - Faça o mesmo para a bobina G da fig. 24-8.
- Analisando a fig. 24-13, explique, resumidamente, como funciona um gerador de corrente alternada.
- Enuncie a lei de Lenz.
 - Diga qual será o sentido do campo magnético, criado pela corrente induzida em um circuito, quando o fluxo magnético através dele estiver aumentando.
 - Faça o mesmo para o caso em que o fluxo magnético através do circuito estiver diminuindo.
 - Analise e procure entender claramente os exemplos 1 e 2 da secção 24.3.

8. a) Para que serve um transformador?
 b) Diga quais são as partes fundamentais que constituem um transformador.
 c) Explique como funciona este aparelho.
 d) Escreva a relação matemática entre as voltagens no primário e no secundário e o número de espiras em cada um desses enrolamentos.
9. a) O que é um campo elétrico induzido?
 b) O que é um campo magnético induzido?
10. a) Diga com suas palavras o que é uma onda eletromagnética.
 b) Explique por que uma onda eletromagnética é gerada no dispositivo mostrado na fig. 24-23.
11. a) Qual é a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo?
 b) O que levou Maxwell a suspeitar que a luz é uma onda eletromagnética?
12. a) Diga os nomes das diversas radiações que constituem o espectro eletromagnético.
 b) Descreva as principais características de cada uma dessas radiações.

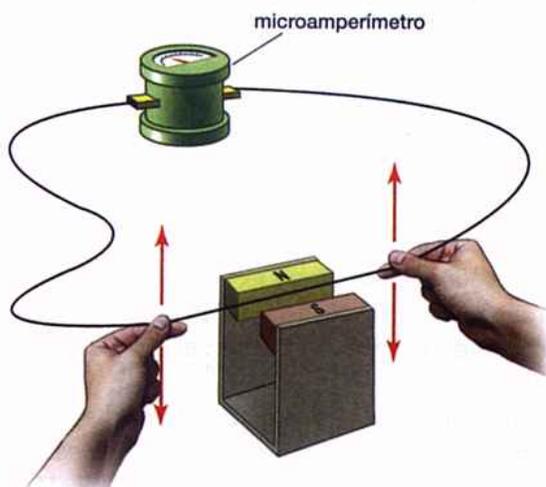
algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

Faça uma montagem como aquela mostrada na figura desta experiência, usando um ímã muito forte e um microamperímetro bastante sensível.

Ao movimentarmos o fio entre os pólos do ímã, uma f.e.m. induzida será estabelecida nele, como vimos na secção 24.1. Esta f.e.m. dará origem a uma corrente induzida que será indicada pelo microamperímetro. Movimentando o fio para cima e para baixo (veja a figura) o microamperímetro indicará uma corrente ora em um sentido, ora em sentido contrário (como era de esperar pela lei de Lenz).



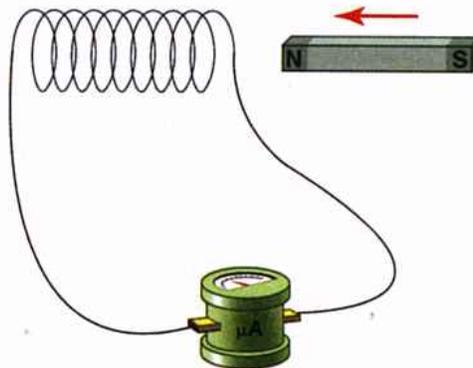
Primeira experiência.

Observação: A corrente induzida no fio só poderá ser percebida se o campo magnético for muito intenso. Se você não dispuser de um ímã suficientemente forte, poderá usar um eletroímã construído com núcleo de ferro e com bobinas de elevado número de espiras.

Segunda experiência

Ligue as extremidades de uma bobina com cerca de 300 espiras a um microamperímetro sensível (veja a figura desta experiência).

- 1º) Aproxime rapidamente da bobina um dos pólos de um ímã, como mostra a figura. Em virtude da variação do fluxo magnético através da bobina, haverá nela uma corrente induzida (lei de Faraday). Observe que o microamperímetro indica a passagem desta corrente.
- 2º) Mantenha o ímã parado no interior da bobina. Nestas condições, há fluxo magnético através da bobina? Este fluxo está variando? Observe, então, se o microamperímetro indica a passagem de corrente.
- 3º) Afaste rapidamente o ímã da bobina. Observe, no microamperímetro, se o sentido da corrente se inverteu (em relação ao sentido observado na 1ª parte).
- 4º) Repita a experiência aproximando e afastando da bobina o outro pólo do ímã. Observe as deflexões do microamperímetro e compare com suas observações anteriores.

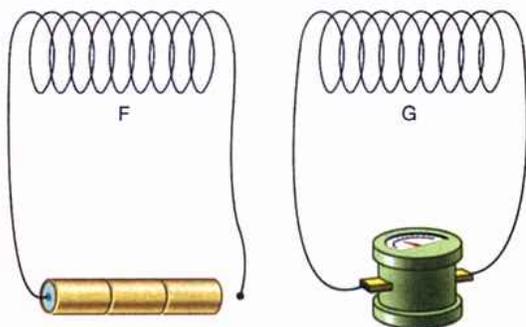


Segunda experiência.

Terceira experiência

As duas bobinas mostradas na figura desta experiência devem possuir cerca de 300 espiras cada uma. Ligue uma das extremidades da bobina *F* a um dos pólos de uma bateria constituída de três ou quatro pilhas secas. A bobina *G* deve ser ligada a um microamperímetro sensível. Coloque as duas bobinas próximas uma da outra, da maneira mostrada na figura.

- 1º) Faça o contato da extremidade livre de *F* com a bateria, fechando o circuito desta bobina. Observe que, neste instante, o microamperímetro acusa a passagem de uma corrente na bobina *G*. Explique por que isto acontece (veja a secção 24.2).
- 2º) Mantenha fechado o circuito da bobina *F*. Nestas condições, há fluxo magnético através da bobina *G*? Este fluxo está variando? Observe, então, se o microamperímetro indica a passagem de corrente induzida em *G*.
- 3º) Desligue o circuito da bobina *F* e verifique, no microamperímetro, que aparecerá novamente uma corrente induzida em *G*. Esta corrente possui o mesmo sentido ou sentido contrário ao da corrente observada na 1ª parte?



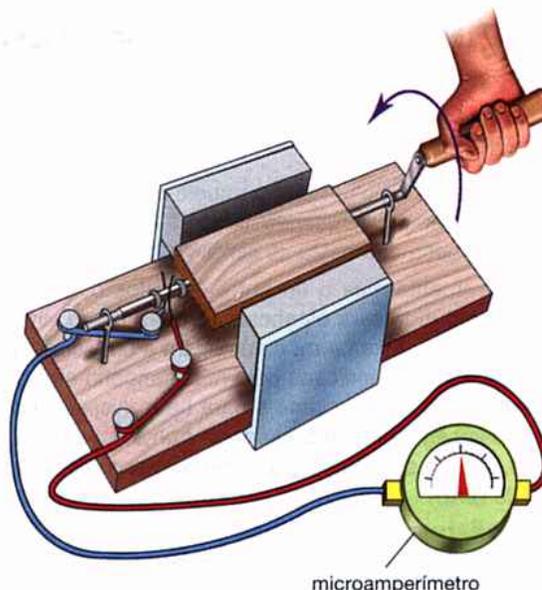
Terceira experiência.

Quarta experiência

O motor que você construiu na quinta experiência do capítulo 22 pode ser usado como um dínamo, isto é, como um gerador de corrente.

Para isto, desligue as pilhas do motor e ligue-o a um microamperímetro sensível, como mostra a figura desta experiência. Gire as espiras, em um determinado sentido, com suas próprias mãos. Enquanto as espiras estão girando, o fluxo magnético através delas estará variando continuamente e, portanto, uma corrente induzida será estabelecida no circuito. Observe que o microamperímetro indica a passagem desta corrente.

Gire as espiras, agora, em sentido contrário ao anterior. Observe o que ocorre com o sentido da corrente indicada no microamperímetro.



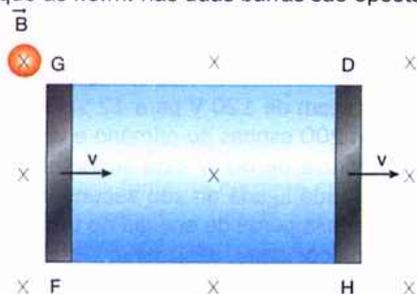
Quarta experiência.

ATIVIDADES COMPLEMENTARES

- 1º) Procure observar o núcleo de ferro de um transformador. Você verá que ele é constituído de placas de ferro justapostas (diz-se que o núcleo é laminado), separadas por um verniz isolante. Isto é feito para evitar a formação de *correntes de Foucault*. Faça uma pesquisa bibliográfica (ou consulte alguma pessoa que conheça o assunto) para saber o que são essas correntes, por que elas devem ser evitadas e qual a sua relação com o fenômeno da indução eletromagnética.
- 2º) É provável que nas proximidades de onde você reside exista uma usina hidrelétrica ou termoelétrica, até mesmo de pequeno porte. Tente obter autorização para uma visita de sua classe às instalações desta usina. Isto deve ser feito após a discussão, com seus colegas e seu professor, da secção 24.7 (Tópico Especial).
- 3º) Quando um circuito elétrico é desligado, você pode observar que uma centelha salta no local da interrupção. Isto ocorre em virtude de um fenômeno denominado *auto-indução*. Tente observar este fenômeno e procure entender por que ele ocorre, fazendo uma pesquisa bibliográfica ou consultando pessoas especializadas no assunto.

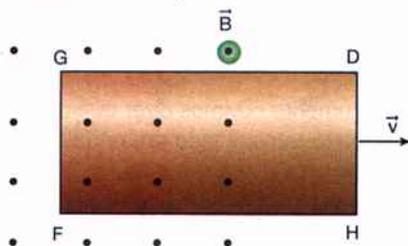
Problemas e testes

- A distância entre as extremidades das asas metálicas de um avião é 20 m. Este avião está voando horizontalmente, com uma velocidade de 300 m/s, em uma região onde o campo magnético da Terra tem uma componente vertical, dirigida para cima, cujo valor é $6,0 \times 10^{-5}$ T.
 - Em virtude da separação de cargas, de que lado do avião o potencial é mais elevado?
 - Qual o valor da f.e.m. induzida entre as extremidades das asas do avião?
- Dois barras metálicas, *GF* e *DH*, estão se deslocando com a mesma velocidade em um campo magnético uniforme, como mostra a figura deste problema. As barras estão ligadas pelos fios condutores *GD* e *FH*. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*.
 - Em ambas as barras haverá uma separação de cargas.
 - A extremidade *G* fica positiva e *F* fica negativa.
 - A extremidade *D* fica positiva e *H* fica negativa.
 - A f.e.m. induzida em *GF* é igual à f.e.m. induzida em *DH*.
 - Não haverá corrente induzida nos fios condutores porque as f.e.m. nas duas barras são opostas.



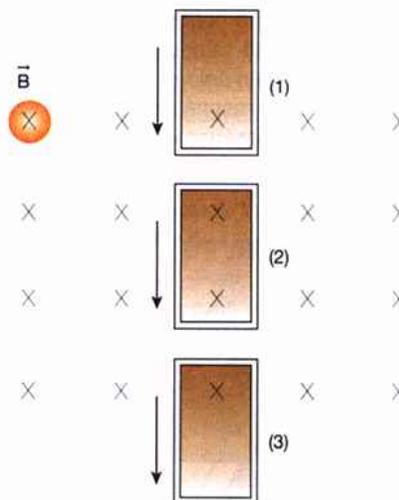
Problema 2.

- A figura deste problema mostra uma espira retangular abandonando, com uma velocidade \vec{v} , uma região onde existe um campo magnético \vec{B} .
 - O fluxo magnético através da espira está aumentando ou diminuindo?
 - Usando a lei de Lenz, determine o sentido da corrente induzida na espira.



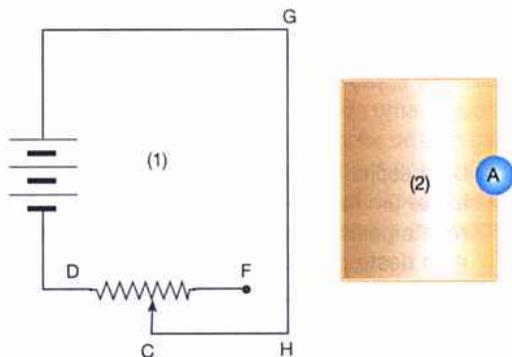
Problema 3.

- Uma espira retangular penetra em uma região onde existe um campo magnético \vec{B} , passando sucessivamente pelas posições (1), (2) e (3) mostradas na figura deste problema. Assinale, entre as afirmativas seguintes, aquela que está *errada*.
 - Quando a espira está passando pela posição (1), o fluxo magnético através dela está aumentando.
 - Quando a espira está passando pela posição (2), o fluxo magnético através dela não está variando.
 - Quando a espira está passando pela posição (3), o fluxo magnético através dela está diminuindo.
 - O sentido da corrente induzida é o mesmo, tanto na posição (1), quanto na posição (3).
 - Não há corrente induzida na espira quando ela passa pela posição (2).



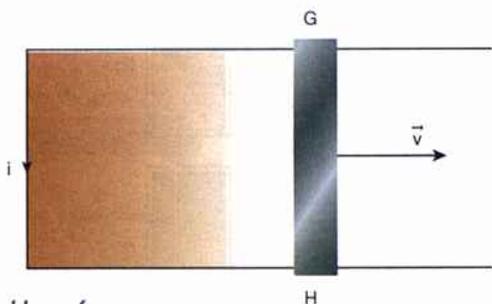
Problema 4.

- Considere os circuitos (1) e (2) mostrados na figura deste problema. Entre as afirmativas seguintes, assinale aquelas que estão *corretas*.
 - A corrente no fio *GH* estabelece um campo magnético \vec{B} que está entrando no interior da espira (2).
 - Com o cursor fixo na posição *C*, o fluxo magnético através da espira (2) é nulo.
 - Enquanto o cursor estiver se deslocando de *C* para *F*, o fluxo magnético através da espira (2) estará aumentando.
 - Enquanto o cursor estiver se deslocando de *C* para *D*, haverá uma corrente induzida na espira (2).
 - Deslocando-se o cursor sucessivamente para *D* e para *F*, teremos uma corrente alternada na espira (2).



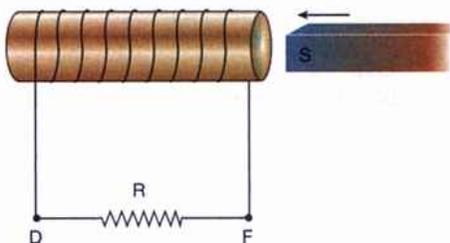
Problema 5.

6. O conjunto mostrado na figura deste problema está colocado dentro de um campo magnético externo \vec{B} , perpendicular à folha de papel, cujo sentido não é conhecido. Deslocando-se a barra GH para a direita, observa-se que uma corrente induzida i percorre o circuito no sentido indicado na figura. Assinale, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas:
- O fluxo magnético através do circuito está aumentando.
 - O campo que a corrente induzida cria no interior do circuito está saindo do papel.
 - O campo criado pela corrente induzida tende a diminuir o fluxo magnético através do circuito.
 - O campo magnético externo \vec{B} está entrando na folha de papel.



Problema 6.

7. O pólo sul de um ímã é aproximado de uma bobina da maneira indicada na figura deste problema.
- Qual é o sentido da corrente induzida na resistência R ?
 - O pólo sul do ímã será repelido ou atraído pela bobina?

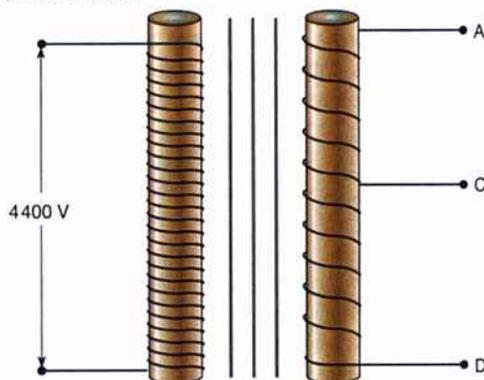


Problema 7.

8. Uma espira circular, de raio $R = 10$ cm, está colocada perpendicularmente a um campo magnético uniforme de módulo $B = 0,10$ T. Reduzindo-se uniformemente o valor de \vec{B} para zero, observa-se que uma f.e.m. induzida $\varepsilon = 0,02$ V aparece na espira. Quanto tempo decorreu até que o valor de \vec{B} se reduzisse a zero?

9. O transformador representado na figura deste problema possui 2 000 espiras no primário e 100 espiras no secundário. Aplicando-se uma voltagem alternada de 4 400 V no primário, determine a leitura de um voltímetro supondo que ele seja ligado:

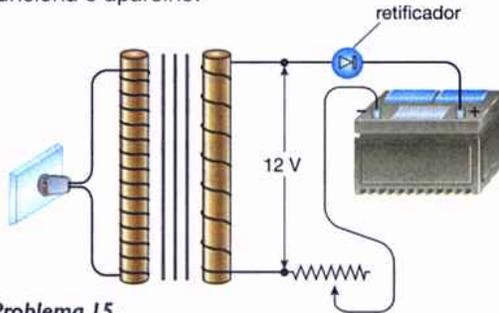
- Entre A e C.
- Entre C e D.
- Entre A e D.



Problema 9.

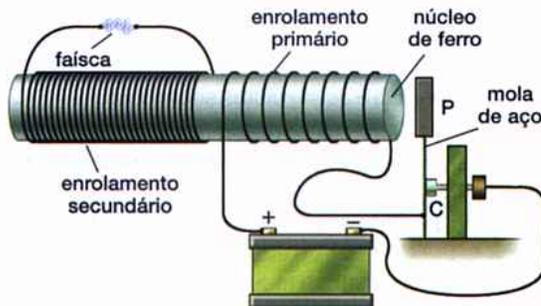
10. Um transformador está sendo usado para abaixar a voltagem de 120 V para 12 V. Este transformador tem 200 espiras no primário e verifica-se que uma potência de 60 W está sendo dissipada em uma lâmpada ligada ao seu secundário. Supondo que não haja perda de energia no transformador (transformador ideal), determine:
- O número de espiras no secundário.
 - A corrente no secundário.
 - A corrente no primário.
11. Um aparelho de radar é usado para localizar um objeto distante (um avião, por exemplo) por meio de ondas eletromagnéticas que são emitidas pelo aparelho, refletidas pelo objeto e captadas, na volta, pelo próprio aparelho de radar. As radiações eletromagnéticas usadas neste dispositivo têm, no ar, um comprimento de onda de, aproximadamente, 1 cm. Qual é, então, o tipo de onda eletromagnética utilizada nos aparelhos de radar?
12. Comumente ouvimos dizer que uma estação de rádio está transmitindo em ondas longas, em ondas médias e em ondas curtas.
- Procure explicar a origem das denominações dadas a estas ondas de rádio.
 - Qual dessas ondas possui maior frequência?

13. Na figura do problema 3 deste capítulo, suponha que a velocidade da espira seja $v = 10 \text{ m/s}$, que sua resistência elétrica seja $R = 0,80 \Omega$ e que o valor do campo magnético seja $B = 0,20 \text{ T}$. Considerando $GF = 20 \text{ cm}$, responda:
- Qual é o módulo e o sentido da força magnética que atua sobre o lado GF ?
 - Qual o trabalho que deve ser realizado para deslocar a espira, durante $0,50 \text{ s}$, com velocidade constante?
 - Qual é a quantidade de calor dissipada na espira durante este mesmo intervalo de tempo?
 - Explique por que os resultados obtidos em (b) e (c) são iguais.
14. Responda às questões do problema 10 deste capítulo, supondo, agora, que o rendimento do transformador seja de 90% , isto é, a potência obtida no secundário é apenas 90% daquela entregue ao primário.
15. A figura deste problema representa o circuito de um carregador de bateria, alimentado por uma voltagem de 120 V . Analise o circuito e explique como funciona o aparelho.



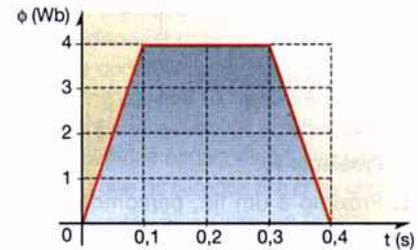
Problema 15.

16. Para se obter voltagem elevada quando se dispõe apenas de uma fonte de corrente contínua (uma bateria, por exemplo), usa-se uma bobina de indução. Uma bobina como essa é empregada nos sistemas de ignição dos automóveis, para fornecer alta voltagem às velas. O circuito esquemático de uma bobina de indução está mostrado na figura deste problema, na qual P é uma placa de ferro e C é um contato que está apenas encostado na mola de aço. Analise o circuito e descreva o funcionamento desta bobina.



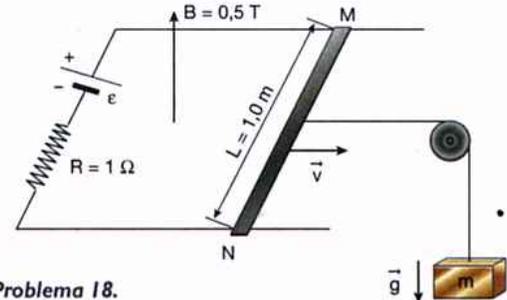
Problema 16.

17. O fluxo magnético através de uma bobina varia com o tempo de acordo com o gráfico mostrado na figura deste problema. Sabe-se que a bobina constitui um circuito fechado, cuja resistência é igual a 10Ω .
- Calcule o valor da corrente elétrica na bobina, entre $t = 0$ e $t = 0,1 \text{ s}$.
 - Faça o mesmo para o intervalo entre $t = 0,1 \text{ s}$ e $t = 0,3 \text{ s}$.
 - Qual é o valor da corrente no intervalo entre $t = 0,3 \text{ s}$ e $t = 0,4 \text{ s}$? Esta corrente tem as mesmas características daquela calculada em (a)?



Problema 17.

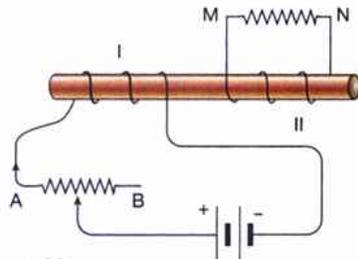
18. Na figura deste problema, a barra condutora MN se desloca com velocidade constante $v = 4,0 \text{ m/s}$, apoiada em trilhos condutores paralelos, puxada por um corpo suspenso, de massa $m = 200 \text{ g}$. A resistência total do circuito é $R = 1 \Omega$ (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$).
- Qual é o valor da f.e.m. induzida em MN ?
 - Determine o valor da f.e.m. ϵ do gerador ligado ao circuito.



Problema 18.

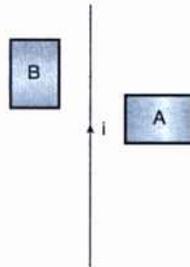
19. Em torno de um cilindro de ferro, cuja base tem área igual a 10 cm^2 , enrolam-se 100 espiras de um fio de cobre, cujos extremos são ligados a um resistor, de modo que a resistência total do circuito seja igual a 10Ω . Suponha que um campo magnético, aplicado no cilindro de ferro na direção do seu eixo, varie uniformemente de 1 T em um sentido, a 1 T em sentido contrário.
- Calcule a quantidade de carga que passa por um ponto qualquer deste circuito, durante esta variação.
 - Se a variação do campo magnético se processasse com maior rapidez, haveria modificação no valor da carga calculada em (a)? Explique.

20. As bobinas I e II, enroladas no mesmo núcleo de ferro, estão isoladas uma da outra e deste núcleo (veja a figura deste problema).
- Qual é o sentido da corrente no resistor MN , supondo que o cursor do reostato mostrado esteja se deslocando de A para B ?
 - Se o cursor do reostato permanecer fixo na posição mostrada na figura, haverá fluxo magnético através da bobina II? Haverá corrente em MN ?



Problema 20.

21. Próximo a um fio, percorrido por uma corrente i , são colocadas duas espiras, A e B , da maneira mostrada na figura deste problema. Supondo que a corrente no fio esteja aumentando com o tempo, dizer se a corrente induzida terá o sentido horário ou anti-horário:
- Na espira A .
 - Na espira B .



Problema 21.

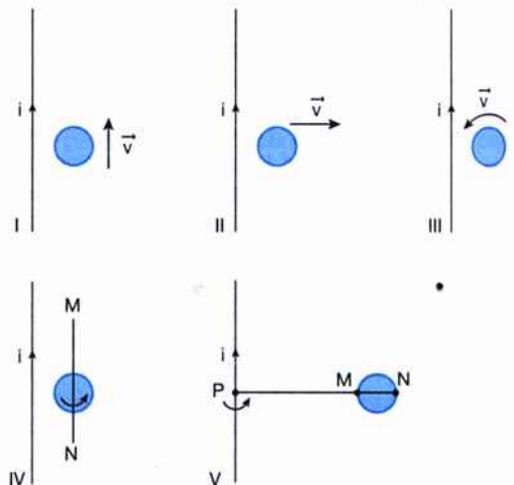
22. Uma espira circular de prata é colocada em um campo magnético uniforme, com seu plano perpendicular ao vetor \vec{B} . A área da seção reta do fio de prata é $A = 2,0 \text{ mm}^2$ e o raio da espira é $a = 30 \text{ cm}$. Supondo que o campo magnético esteja variando com uma taxa de $0,050 \text{ T/s}$, determine a intensidade da corrente na espira.
23. Medindo-se a intensidade das radiações eletromagnéticas emitidas pelo Sol, ao atingirem a atmosfera da Terra, foi encontrado o valor de $1\,400 \text{ W/m}^2$ (com a radiação incidindo perpendicularmente à superfície). Considerando a distância da Terra ao Sol igual a $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$, calcule a potência total das radiações eletromagnéticas emitidas pelo Sol.
24. Uma locomotiva se movimenta em trilhos horizontais, em uma região situada no hemisfério norte da Terra. Dizer se sua roda direita estará em um potencial maior ou menor do que a roda esquerda, supondo que a locomotiva esteja se deslocando:
- Do sul para o norte.
 - Do norte para o sul.
 - De leste para oeste.

25. Um pequeno gerador de corrente contínua é acionado manualmente por meio de uma manivela. Um estudante, que está girando a manivela, percebe que, estando o gerador em circuito aberto (sem nenhum aparelho ligado a ele), é muito fácil provocar esta rotação (o gerador parece leve). Entretanto, quando um aparelho é ligado ao gerador, o estudante percebe que há uma resistência muito maior para mantê-lo em rotação (o gerador parece pesado). Explique por que isto ocorre.

26. A figura deste problema mostra um fio reto e comprido, percorrido por uma corrente i , tendo ao seu lado uma espira circular de cobre, que pode se movimentar de cinco maneiras diferentes:

- A espira se movimenta com velocidade \vec{v} , paralela ao fio.
- A espira se movimenta com velocidade \vec{v} , perpendicular ao fio, afastando-se dele.
- A espira gira em torno de um eixo, perpendicular ao seu plano, passando pelo seu centro.
- A espira gira em torno de um eixo MN , paralelo ao fio, situado no plano da espira e passando por seu centro.
- Uma haste rígida, isolante, está fixada nos pontos M e N da espira e o conjunto gira em torno de um ponto P do fio.

Dizer em quais destas situações haverá uma corrente induzida na espira.

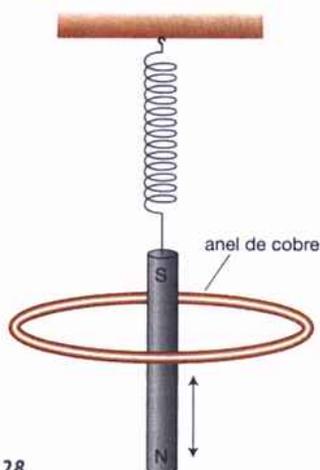


Problema 26.

27. Considere as seguintes situações:

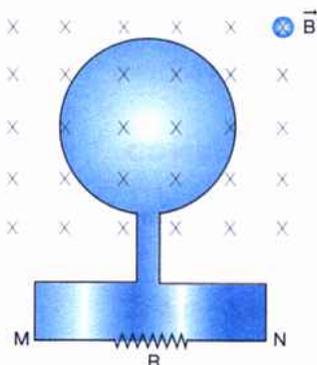
- Elétrons livres em um fio condutor, no qual foi estabelecida uma corrente alternada de alta frequência.
- Elétrons em movimento circular uniforme, no interior de um acelerador de partículas.
- Elétrons em movimento, a partir do repouso, em um campo elétrico uniforme de grande intensidade.

- a) Em quais destas situações os elétrons estarão emitindo radiações eletromagnéticas? Explique.
 b) Na situação III, a energia cinética adquirida pelo elétron, após percorrer uma certa distância, é maior, menor ou igual ao trabalho que o campo realiza sobre ele? Por quê?
28. Um ímã está oscilando verticalmente, preso a uma mola, passando pelo centro de um anel de cobre, como mostra a figura deste problema. Tendo em vista o princípio de conservação da energia, dizer se a amplitude de oscilação do ímã aumenta, diminui ou não se modifica, enquanto ele oscila. Explique sua resposta, supondo que as forças de atrito sejam desprezíveis.



Problema 28.

Observação: Para resolver o problema seguinte, é necessário que tenha aprendido, em seu curso de Matemática, como derivar uma função algébrica.



Problema 29.

29. O fluxo magnético através da espira mostrada na figura deste problema varia com o tempo de acordo com a seguinte relação:
 $\phi = at^2 + bt + c$, onde a , b e c são constantes positivas (o campo magnético \vec{B} varia com o tempo). Sabendo-se que, nestas condições, a lei de Faraday toma a forma $\varepsilon = d\phi/dt$:

- a) Determine o valor da f.e.m. induzida na espira, no instante $t = b/a$.
 b) Qual é o sentido da corrente induzida em R , no instante considerado na questão anterior?

30. Resolvendo este problema, você terá uma idéia de como Maxwell conseguiu calcular teoricamente o valor da velocidade de uma onda eletromagnética. Considere uma onda eletromagnética se propagando, no vácuo, ao longo do eixo Ox mostrado na figura deste problema. Usando as equações estabelecidas por ele próprio, denominadas equações de Maxwell, esse cientista mostrou que os campos \vec{E} e \vec{B} da onda que se propaga obedecem as seguintes relações:

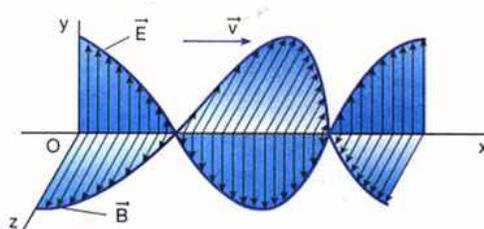
$$k_0 \frac{d^2 E}{dx^2} = C_0 \frac{d^2 E}{dt^2} \quad \text{e} \quad k_0 \frac{d^2 B}{dx^2} = C_0 \frac{d^2 B}{dt^2}$$

onde k_0 é a constante da lei de Coulomb e C_0 é uma constante magnética, cujo valor no S.I. é $C_0 = 10^{-7} \text{ N/A}^2$. Sabe-se que uma onda qualquer, propagando-se com uma velocidade v ao longo de um eixo Ox , obedece a seguinte relação:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 y}{dt^2}$$

na qual y é a grandeza que está oscilando.

- a) Comparando as três relações fornecidas, determine uma expressão que permita calcular o valor v da velocidade de uma onda eletromagnética, no vácuo, em função das constantes k_0 e C_0 .
 b) Substituindo os valores de k_0 e C_0 na expressão obtida em (a), calcule o valor numérico de v .
 c) O valor obtido em (c) concorda com as afirmações feitas na secção 24.5?



Problema 30.

Resolva as questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

apêndice F

F.1. Capacitores

O QUE É UM CAPACITOR

Um dispositivo muito usado em circuitos elétricos é denominado *capacitor*. Este aparelho é constituído por dois condutores separados por um isolante: os condutores são chamados *armaduras* (ou placas) do capacitor e o isolante é o *dielétrico* do capacitor. Costuma-se dar nome a esses aparelhos de acordo com a forma de suas armaduras. Assim temos *capacitor plano* (fig. F-1), *capacitor cilíndrico* (fig. F-2), *capacitor esférico* etc. O dielétrico pode ser um isolante qualquer como o vidro, a parafina, o papel e muitas vezes é o próprio ar. Nos diagramas de circuitos elétricos o capacitor é representado da maneira mostrada na fig. F-3.

Na fig. F-2 mostramos um dos primeiros aparelhos como esse, que foi construído na cidade holandesa de Leyden e recebeu o nome de *garrafa de Leyden*. Suas armaduras são folhas metálicas que envolvem o recipiente interna e externamente e o dielétrico é o próprio vidro da garrafa. Estes aparelhos antigos ocupavam um volume muito grande em comparação com os modernos capacitores atuais.

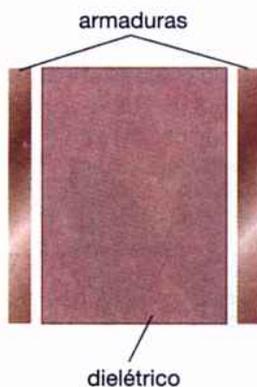


Fig. F-1: Ilustração esquemática. Um capacitor é constituído por duas superfícies condutoras separadas por um dielétrico.

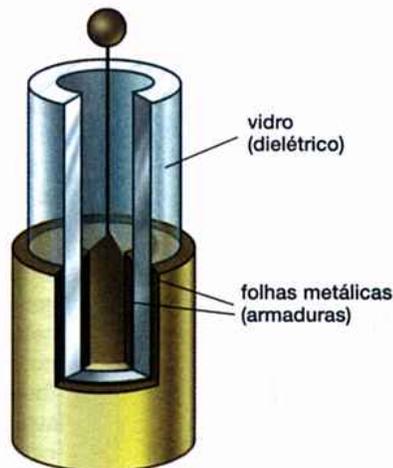


Fig. F-2: Esquema de capacitor cilíndrico, construído na cidade de Leyden e por isso chamado garrafa de Leyden.

Fig. F-3: Em um circuito elétrico o capacitor é representado da maneira mostrada nesta figura.



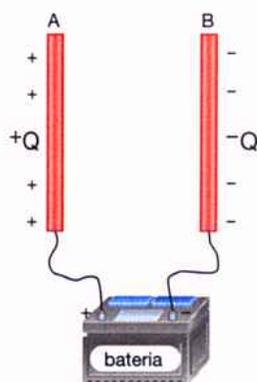


Fig. F-4: Ilustração esquemática. As armaduras de um capacitor recebem cargas elétricas ao serem ligadas aos pólos de uma bateria.

CAPACITÂNCIA DE UM CAPACITOR

Consideremos um capacitor qualquer, com as armaduras planas, por exemplo, e liguemos estas armaduras aos pólos de uma bateria, como mostra a fig. F-4. Em virtude desta ligação, estas armaduras receberão cargas: a armadura A , ligada ao pólo positivo, recebe uma carga $+Q$ e a armadura B , ligada ao pólo negativo, recebe uma carga $-Q$. Dizemos, então, que o capacitor ficou carregado com carga Q . É fácil concluir que, nestas condições, há entre as armaduras do capacitor uma diferença de potencial V_{AB} , igual àquela entre os pólos da bateria.

Pode-se perceber também que, se o capacitor for ligado a outra bateria de maior voltagem, a carga que as placas irão adquirir será maior. Entretanto, verifica-se que, para um dado capacitor, a relação entre a carga Q adquirida e a diferença de potencial V_{AB} aplicada é constante. Esta constante, denominada *capacitância* do capacitor, é característica do aparelho e é representada pelo símbolo C . Assim temos:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}}$$

No S.I., medindo-se a carga em coulombs e a voltagem em volts, a capacitância é medida em *farads*, que se representa por F. Então, temos:

$$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$$

Em resumo, podemos escrever:

a capacitância C de um capacitor é obtida dividindo-se a carga Q , distribuída em suas armaduras, pela voltagem aplicada a elas. A expressão matemática desta grandeza é

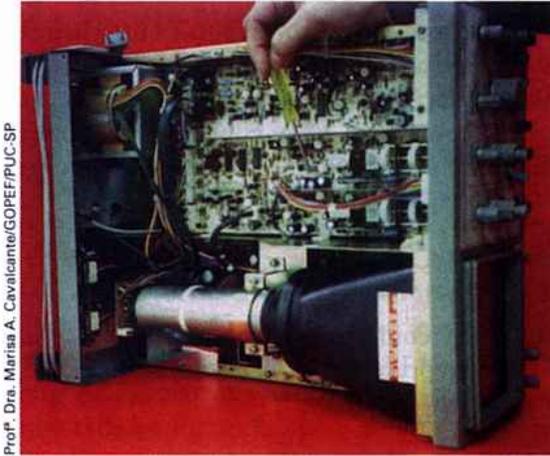
$$C = \frac{Q}{V_{AB}}$$

A unidade de medida de C no S.I. é o farad ($1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$).

COMENTÁRIOS

- 1) Quando dizemos que um capacitor possui uma carga Q , estamos nos referindo à carga em uma das armaduras apenas. A carga total é evidentemente nula, pois temos uma carga $+Q$ em uma armadura e uma carga $-Q$ na outra.
- 2) A unidade 1 farad ($1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$) é muito grande, pois dificilmente poderíamos obter um capacitor que, recebendo a carga de 1 coulomb em suas armaduras, adquirisse o potencial de 1 volt apenas. A unidade mais usada na prática, isto é, na medida de capacitâncias mais comuns nos laboratórios e oficinas é o microfarad, que é representado por $1 \mu\text{F}$. O microfarad é um submúltiplo do farad tal que $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$.
- 3) Devemos observar pela expressão que define a capacitância, $C = Q/V_{AB}$, que, para uma dada voltagem aplicada nas armaduras, quanto maior for a capacitância, maior será a carga acumulada nestas armaduras. Por este motivo dizemos que o capacitor é um “armazenador” de cargas elétricas e quanto maior for sua capacitância maior será a carga que ele é capaz de armazenar.

- 4) A propriedade do capacitor de ser um bom armazenador de cargas elétricas faz com que ele possa ser empregado nos circuitos de rádio, televisão, máquina de calcular etc. Estes aparelhos são tão importantes nos circuitos eletrônicos, de maneira geral, que sua indústria tem acompanhado o grande desenvolvimento científico e tecnológico do mundo moderno, apresentando novos modelos cada vez mais aperfeiçoados. Na fig. F-5 mostramos a fotografia de um osciloscópio, aparelho muito usado nos laboratórios de eletrônica e em cujo circuito são utilizados vários capacitores.



Prof. Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

Fig. F-5: Os capacitores são usados nos circuitos de diversos aparelhos. A figura mostra o interior de um osciloscópio no qual são empregados vários capacitores.

FATORES QUE INFLUENCIAM NA CAPACITÂNCIA

A capacitância de um capacitor, como vimos, é uma constante característica do aparelho. Assim, ela vai depender de certos fatores próprios do capacitor, que examinaremos a seguir.

A área das armaduras, por exemplo, influi na capacitância, que é tanto maior quanto maior for o valor desta área. Em outras palavras, a capacitância C é proporcional à área A de cada armadura, ou seja

$$C \propto A$$

Então, para aumentarmos a capacitância de um capacitor, devemos aumentar a área de suas armaduras. Nos capacitores antigos, como a garrafa de Leyden, para se obter este efeito, tinha-se que aumentar muito o volume ocupado por eles, tornando assim incômodo o seu uso. Capacitores mais modernos, como aquele mostrado na fig. F-6, apresentam grande capacitância e ocupam volume relativamente pequeno. Isto é obtido usando como armaduras folhas de alumínio compridas, separadas por papel parafinado e enroladas da maneira mostrada na figura, de modo a ocupar pequeno volume, embora a área das placas seja grande.

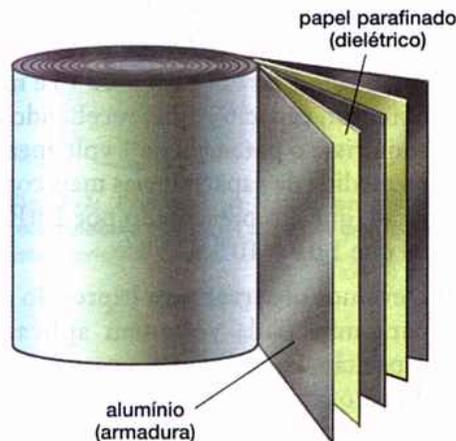


Fig. F-6: Ilustração esquemática. Os capacitores mais modernos apresentam capacitâncias relativamente grandes, ocupando pequenos volumes.

O fato de a capacitância depender da área das armaduras é aproveitado na construção de certos tipos de aparelhos, denominados *capacitores variáveis*. Na fig. F-7 mostramos um esquema deste capacitor. Um conjunto das armaduras do aparelho é móvel, podendo girar em torno de um eixo. À medida que giramos este conjunto, há uma variação na área das armaduras que se defrontam e, assim, varia também a capacitância do aparelho. Capacitores como estes se encontram nos sintonizadores dos rádios.

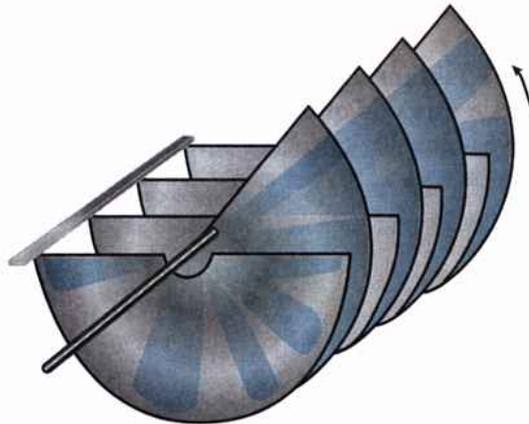


Fig. F-7: Esquema de um capacitor variável.

A espessura do dielétrico é um outro fator que influi na capacitância. Verifica-se que quanto menor for a distância d entre as armaduras maior será a capacitância C do aparelho, isto é

$$C \propto \frac{1}{d}$$

Este fato também é utilizado nos capacitores modernos, nos quais se usam dielétricos de grande poder de isolamento, com espessura bastante reduzida, de modo a obter grandes capacitâncias.

INFLUÊNCIA DO DIELÉTRICO NA CAPACITÂNCIA

Consideremos um capacitor plano tal que o dielétrico entre as armaduras seja o ar. Carregando-se o capacitor com uma carga Q , uma voltagem V_{AB} será estabelecida nestas armaduras. Sabe-se que se houvesse vácuo entre elas, teríamos condições praticamente iguais àquelas observadas quando existe ar. Então, com vácuo ou ar entre as armaduras, a carga Q estabelece entre elas uma voltagem V_{AB} e a capacitância C_0 deste capacitor é, como sabemos, $C_0 = Q/V_{AB}$ (fig. F-8-a).

Nestas condições, temos no espaço entre estas armaduras um campo elétrico uniforme \vec{E}_0 , criado pelas cargas $+Q$ e $-Q$ existentes nas placas. Entretanto, ao introduzirmos entre as armaduras um dielétrico qualquer (mica, parafina, papel etc., mantendo nelas a mesma carga, o campo elétrico no interior deste dielétrico será inferior a \vec{E}_0 (fig. F-8-b). Sendo K a

constante dielétrica do isolante em questão, o campo passará a valer $E = E_0/K$, como vimos no capítulo 17. Conseqüentemente, a diferença de potencial entre as armaduras também ficará dividida por K (pois $V_{AB} = E \cdot d$), isto é, passará a valer V_{AB}/K . Se Q não varia e a voltagem é reduzida, então a capacitância aumenta, isto é, a capacitância se torna K vezes maior. Portanto, se um capacitor sem dielétrico entre as armaduras (vácuo ou ar) tem capacitância C_0 , ao introduzirmos entre elas um dielétrico de constante K , sua capacitância passará a ser

$$C = KC_0$$

Em outras palavras, um capacitor com dielétrico entre as armaduras é melhor armazenador de carga do que sem ele, pois a introdução do dielétrico faz crescer a capacitância (uma vez que $K > 1$ para qualquer isolante).

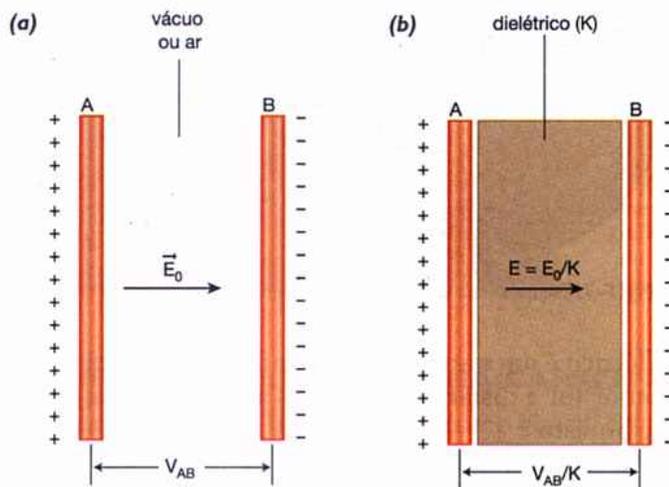


Fig. F-8: Ilustração esquemática. Quando um isolante, de constante dielétrica K , é introduzido entre as armaduras de um capacitor, sua capacitância torna-se K vezes maior.

Podemos então destacar, em relação aos fatores que influem na capacitância:

a capacitância C de um capacitor é uma constante própria do mesmo, caracterizando sua capacidade de armazenar carga. O valor de C é diretamente proporcional à área A das armaduras, isto é,

$$C \propto A$$

e é inversamente proporcional à distância d entre placas (espessura do dielétrico), ou seja,

$$C \propto 1/d$$

Além disso, o valor de C depende da natureza do dielétrico: sendo C_0 a capacitância de um capacitor sem dielétrico, quando introduzimos entre as armaduras um isolante de constante dielétrica K sua capacitância passa a ser

$$C = KC_0$$

Exemplo

Na fig. F-4 mostramos um capacitor ligado aos pólos de uma bateria. Suponha que a voltagem entre os pólos desta bateria seja 300 V e que a carga transferida às placas do capacitor seja $Q = 1,2 \times 10^{-3}$ C.

a) Determine a capacitância C deste capacitor.

Sabemos que $C = Q/V_{AB}$ e temos

$$Q = 1,2 \times 10^{-3} \text{ C} \quad \text{e} \quad V_{AB} = 300 \text{ V}$$

pois a voltagem entre os pólos da bateria é a mesma estabelecida nas placas do capacitor. Então,

$$C = \frac{Q}{V_{AB}} = \frac{1,2 \times 10^{-3} \text{ C}}{300 \text{ V}} \quad \text{donde} \quad C = 4,0 \times 10^{-6} \text{ F} = 4,0 \mu\text{F}$$

b) Mantendo-se o capacitor ligado à bateria e afastando-se as placas de modo que a distância entre elas se torne duas vezes maior, qual será o valor da voltagem V_{AB} entre as placas?

Como as placas continuam ligadas à bateria, o valor de V_{AB} não será alterado, isto é

$$V_{AB} = 300 \text{ V}$$

c) Nas condições mencionadas em (b), qual é a capacitância do capacitor?

Já sabemos que $C \propto 1/d$. Como a variação de d foi a única alteração sofrida pelo capacitor, sua nova capacitância deverá ser duas vezes menor (pois o valor de d foi duplicado), isto é, o novo valor de C será:

$$C = \frac{4,0 \mu\text{F}}{2} \quad \text{ou} \quad C = 2,0 \mu\text{F}$$

d) Ainda nas condições consideradas em (b), qual será a carga Q nas armaduras?

Sendo $C = Q/V_{AB}$, teremos

$$Q = CV_{AB}$$

Sabendo que $V_{AB} = 300$ V e que $C = 2,0 \mu\text{F} = 2,0 \times 10^{-6}$ F, teremos:

$$Q = CV_{AB} = 300 \times 2,0 \times 10^{-6} \quad \text{donde} \quad Q = 6,0 \times 10^{-4} \text{ C}$$

Devemos observar, então, que, embora a voltagem permaneça a mesma, a carga nas armaduras diminui quando elas foram afastadas.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- As armaduras de um capacitor possuem uma carga $Q = 1,5 \times 10^{-4}$ C. Nestas condições, a diferença de potencial entre elas é de 50 V. Determine a capacitância deste capacitor em farad e em μF .
- Ligando-se o capacitor do exercício anterior a uma bateria, cuja voltagem entre os pólos é $V_{AB} = 250$ V, responda:
 - Qual é, então, a capacitância do aparelho?
 - Qual o valor da carga elétrica que agora existe nas armaduras?

3. Um capacitor plano é carregado ligando-se suas armaduras aos pólos de uma bateria. Mantendo-se a ligação com esta bateria e reduzindo-se a distância entre as placas, responda:
- A voltagem entre as armaduras aumenta, diminui ou não se altera?
 - A capacitância do aparelho aumenta, diminui ou não se altera?
 - A carga nas armaduras aumenta, diminui ou não se altera?
4. Um capacitor plano, com ar entre as placas, possui uma capacitância $C = 2,5 \mu\text{F}$. Quando a

carga nas placas é $Q = 4,0 \times 10^{-4} \text{ C}$, existe entre elas uma voltagem $V_{AB} = 160 \text{ V}$ e um campo elétrico $E = 40\,000 \text{ N/C}$. Supondo que o capacitor não esteja ligado a nenhuma bateria e introduzindo-se entre as armaduras um dielétrico de constante $K = 5,0$, determinar quais serão os novos valores:

- Da capacitância do capacitor.
- Da carga em suas armaduras.
- Da voltagem entre as armaduras.
- Do campo elétrico entre as armaduras.

F.2. Associação de capacitores

Quando um técnico ou um especialista necessita introduzir um capacitor no circuito que está montando, nem sempre encontra aparelhos disponíveis, exatamente com a capacitância desejada. Nestes casos, ele lança mão de um recurso que lhe permite contornar o problema. Este recurso consiste na associação de capacitores que possibilita obter a capacitância desejada, pela ligação de vários aparelhos, convenientemente escolhidos, conforme descreveremos a seguir.

CAPACITORES EM PARALELO

Quando tomamos um conjunto de capacitores e unimos suas armaduras da maneira mostrada na fig. F-9-a, dizemos que eles estão ligados *em paralelo*.

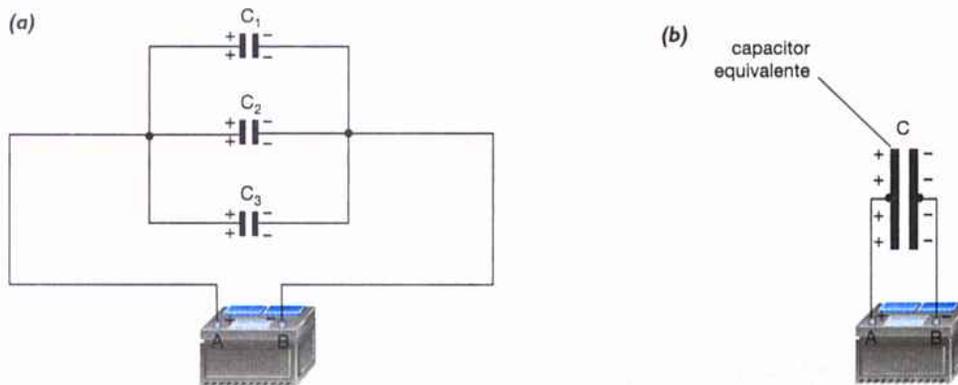


Fig. F-9: A figura apresenta em (a) esquema de três capacitores associados em paralelo e em (b) esquema do capacitor equivalente a esta associação.

Observe que todas as armaduras ligadas ao pólo positivo da bateria estão ligadas entre si, o mesmo acontecendo com aquelas ligadas ao pólo negativo. Então, todos os capacitores apresentam entre suas armaduras a mesma diferença de potencial, que é aquela existente nos pólos da bateria. É fácil perceber, pela relação $C = Q/V_{AB}$, que cada capacitor receberá, assim, uma carga proporcional à sua capacitância. Considerando C_1 , C_2 e C_3 as capacitâncias dos capacitores e Q_1 , Q_2 e Q_3 as cargas nas armaduras de cada um, teremos:

$$C_1 = Q_1/V_{AB}, \quad C_2 = Q_2/V_{AB} \quad \text{e} \quad C_3 = Q_3/V_{AB}$$

$$\text{donde} \quad Q_1 = C_1 V_{AB}, \quad Q_2 = C_2 V_{AB} \quad \text{e} \quad Q_3 = C_3 V_{AB}$$

Procuramos, agora, a capacitância do conjunto, isto é, a capacitância equivalente, C , de um capacitor único que substitua o conjunto (fig. F-9-b). Evidentemente, a voltagem nas armaduras deste capacitor seria, ainda, a mesma, V_{AB} , e para que ele substitua o conjunto, a carga Q em suas placas deverá ser igual à soma das cargas em cada capacitor da associação. Logo

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Mas, como $C = Q/V_{AB}$, virá

$$C = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{V_{AB}} \quad \text{ou} \quad C = \frac{C_1 V_{AB} + C_2 V_{AB} + C_3 V_{AB}}{V_{AB}}$$

e simplificando teremos

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Vemos, assim, que a capacitância total é igual à soma das capacitâncias dos capacitores associados, sendo, portanto, maior do que a capacitância de cada um. Este resultado é válido qualquer que seja o número de capacitores da associação. Resumindo, teremos:

quando vários capacitores, de capacitâncias C_1, C_2, \dots, C_N , são associados em paralelo, todos os capacitores apresentarão a mesma diferença de potencial entre suas armaduras. Cada um receberá uma carga que dependerá de sua capacitância, de acordo com as relações:

$$C_1 = Q_1/V_{AB}, \quad C_2 = Q_2/V_{AB} \dots C_N = Q_N/V_{AB}$$

A capacitância equivalente C , da associação, é igual à soma das capacitâncias dos aparelhos associados, isto é

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_N$$

CAPACITORES EM SÉRIE

Quando vários capacitores são ligados entre si da maneira mostrada na fig. F-10-a, dizemos que temos uma associação de capacitores *em série*. Observe que são apenas as armaduras extremas que estão ligadas à bateria. Assim, a diferença de potencial V_{AB} entre estas armaduras extremas é a soma das voltagens entre as armaduras de cada capacitor. Entretanto, quando o primeiro capacitor se carrega com a carga Q (fig. F-10-a), todos os outros capacitores estarão carregados com esta mesma carga.

Substituindo a associação por um capacitor equivalente (fig. F-10-b), vemos que a diferença de potencial entre suas armaduras terá o mesmo valor V_{AB} da voltagem entre as armaduras extremas da associação (voltagem da bateria). A carga nas armaduras deste capacitor equivalente será ainda igual a Q .

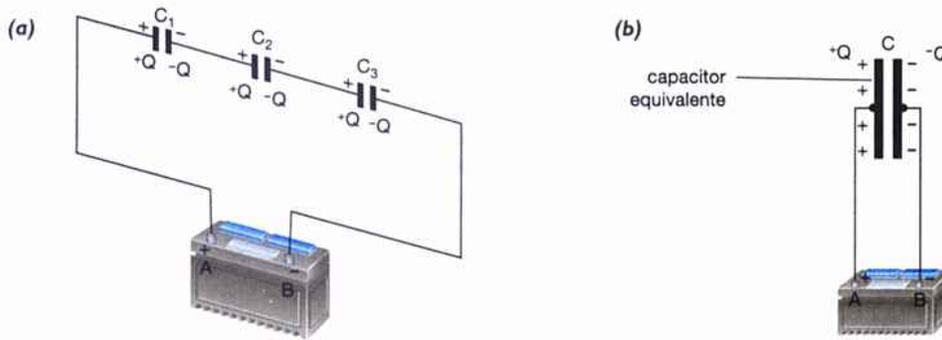


Fig. F-10: Em (a) estão representados esquematicamente três capacitores ligados em série e em (b) vemos o esquema do capacitor equivalente a esta associação.

Designando por C_1 , C_2 e C_3 as capacitâncias dos aparelhos associados, e por C a capacitância do capacitor equivalente, podemos mostrar que existe a seguinte relação entre estas capacitâncias:

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

Portanto, na associação dos capacitores em série, o inverso da capacitância equivalente é igual à soma dos inversos das capacitâncias associadas. Isto indica que a capacitância equivalente é menor do que qualquer uma das capacitâncias da associação, ou seja, quando ligamos os capacitores em série, há uma redução da capacitância.

Resumindo, teremos:

quando vários capacitores, de capacitâncias $C_1, C_2 \dots C_N$, são associados em série, a diferença de potencial entre as armaduras extremas é igual à soma das voltagens entre as armaduras de cada capacitor. A carga distribuída nas armaduras de cada capacitor é a mesma e a capacitância equivalente C é dada pela relação

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

COMENTÁRIOS

- 1) Mostramos que com a associação de capacitores em paralelo obtemos um aumento da capacitância e da carga acumulada nas armaduras. Estes fatos ficam claros se fizermos uma associação de n capacitores, cada um com capacitância C_1 . Sendo Q_1 a carga distribuída nas armaduras de cada capacitor, teremos, então, uma carga total Q acumulada na associação, tal que

$$Q = Q_1 + Q_1 + \dots + Q_1 \quad \text{ou} \quad Q = nQ_1$$

A capacitância C equivalente será

$$C = C_1 + C_1 + \dots + C_1 \quad \text{ou} \quad C = nC_1$$

Então, tanto a carga quanto a capacitância se tornaram n vezes maior.

- 2) Quando associamos em série n capacitores iguais entre si, cada um de capacitância C_1 , já sabemos que a carga Q , em cada capacitor, é a mesma.

Quanto à capacitância equivalente C , teremos:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_1} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{C} = \frac{n}{C_1}$$

$$\text{donde} \quad C = \frac{C_1}{n}$$

Fica então claro que a capacitância da associação se torna n vezes menor.

Exemplo

Na fig. F-11 mostramos uma associação mista de capacitores, apresentando alguns capacitores ligados em paralelo e estes em série com os demais. O conjunto está ligado a uma bateria. Sabe-se que $C_1 = 5,0 \mu\text{F}$, $C_2 = 2,0 \mu\text{F}$, $C_3 = 3,0 \mu\text{F}$ e $C_4 = 10 \mu\text{F}$.

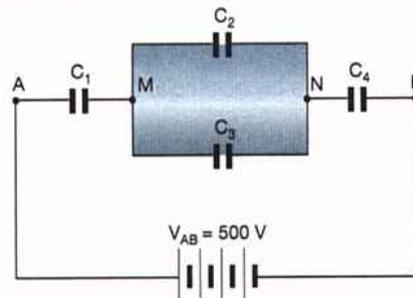


Fig. F-11: Para exemplo da secção F-2.

- a) Determinar a capacitância C' da associação dos capacitores C_2 e C_3 e refazer o diagrama, substituindo estes capacitores pelo capacitor equivalente C' .

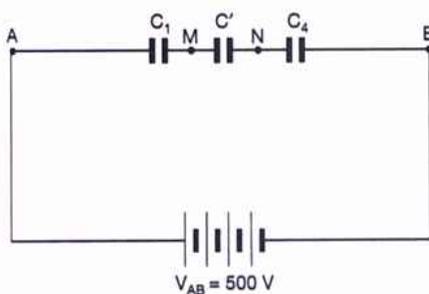


Fig. F-12: Esquema para exemplo da secção F-2.

Vemos, no diagrama, que C_2 e C_3 estão associados em paralelo. A capacitância C' equivalente a esta associação será, portanto:

$$C' = C_2 + C_3 \quad \text{ou} \quad C' = 2,0 + 3,0 \quad \text{ou} \quad C' = 5,0 \mu\text{F}$$

Na fig. F-12 apresentamos o diagrama solicitado na questão.

- b) Calcular a capacitância equivalente total da associação.

Na fig. F-12 vemos que C_1 , C' e C_4 estão associados em série. Então, a capacitância C deste conjunto será dada pela relação

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C'} + \frac{1}{C_4} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{5,0} + \frac{1}{5,0} + \frac{1}{10}$$

$$\text{donde} \quad C = 2,0 \mu\text{F}$$

- c) Sabendo-se que a voltagem fornecida pela bateria é $V_{AB} = 500 \text{ V}$, calcular a carga total na associação e a carga nos capacitores C_1 , C' e C_4 .

Sabemos que $C = Q/V_{AB}$ e que $V_{AB} = 500 \text{ V}$. Como a capacitância total tem o valor $C = 2,0 \mu\text{F} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ F}$, podemos calcular o valor de Q . Teremos:

$$Q = CV_{AB} \quad \text{ou} \quad Q = 2,0 \times 10^{-6} \times 500 \quad \text{donde} \quad Q = 1,0 \times 10^{-3} \text{ C}$$

Como nos capacitores em série a carga tem o mesmo valor em cada um deles, teremos, para cada capacitor

$$Q_1 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ C} \quad Q' = 1,0 \times 10^{-3} \text{ C}$$

$$\text{e} \quad Q_4 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ C}$$

d) Determinar a voltagem nas armaduras dos capacitores C_1 , C' e C_4 .

Considerando a relação que define a capacitância e observando a fig. F-12, teremos:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_{AM}} \quad \text{donde} \quad V_{AM} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{5,0 \times 10^{-6}} \quad \text{ou} \quad V_{AM} = 200 \text{ V}$$

$$C' = \frac{Q'}{V_{MN}} \quad \text{donde} \quad V_{MN} = \frac{Q'}{C'} = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{5,0 \times 10^{-6}} \quad \text{ou} \quad V_{MN} = 200 \text{ V}$$

$$C_4 = \frac{Q_4}{V_{NB}} \quad \text{donde} \quad V_{NB} = \frac{Q_4}{C_4} = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-6}} \quad \text{ou} \quad V_{NB} = 100 \text{ V}$$

Observe que

$$V_{AB} = V_{AM} + V_{MN} + V_{NB} \quad \text{ou} \quad V_{AB} = 200 + 200 + 100 \quad \text{ou} \quad V_{AB} = 500 \text{ V}$$

e) Determinar as voltagens e as cargas nos capacitores C_2 e C_3 .

Como estes capacitores estão ligados em paralelo, a voltagem nas armaduras de cada um é igual à voltagem V_{MN} , isto é, em ambos a voltagem aplicada às armaduras é de 200 V.

Então, ainda pela relação que define a capacitância, teremos:

$$C_2 = \frac{Q_2}{V_{MN}} \quad \text{donde} \quad Q_2 = C_2 \cdot V_{MN} = 2,0 \times 10^{-6} \times 200 \quad \text{ou} \quad Q_2 = 4,0 \times 10^{-4} \text{ C}$$

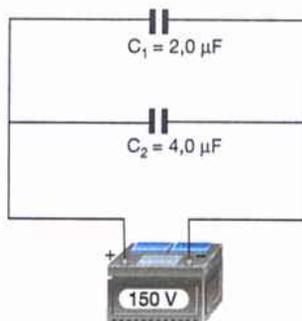
$$C_3 = \frac{Q_3}{V_{MN}} \quad \text{donde} \quad Q_3 = C_3 \cdot V_{MN} = 3,0 \times 10^{-6} \times 200 \quad \text{ou} \quad Q_3 = 6,0 \times 10^{-4} \text{ C}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

5. Observe a figura deste exercício e responda:

- Qual é o tipo de associação dos capacitores C_1 e C_2 ?
- Qual é a diferença de potencial entre as armaduras de cada capacitor?
- Qual é o valor da capacitância equivalente desta associação?



Exercício 5.

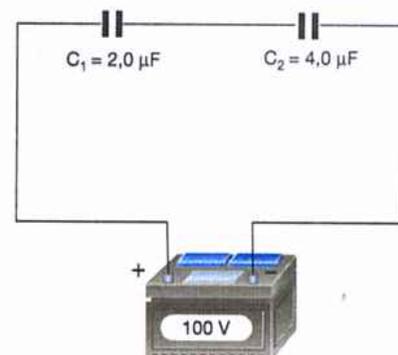
6. Considerando a associação do exercício anterior, determine:

- A carga Q_1 distribuída nas armaduras do capacitor C_1 .

- A carga Q_2 na armadura do capacitor C_2 .
- A carga total Q armazenada na associação.

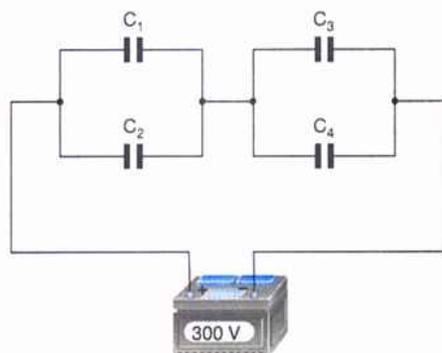
7. Observe a figura deste exercício e responda:

- Qual é o tipo de associação dos capacitores C_1 e C_2 ?
- A carga Q_1 , distribuída nas armaduras do capacitor C_1 , é maior, menor ou igual à carga distribuída em C_2 ?



Exercício 7.

8. Considerando a associação do exercício anterior, determine:
- A capacitância equivalente C da associação.
 - A carga Q do capacitor equivalente à associação.



Exercício 9.

9. Na associação mostrada na figura deste exercício, responda:
- Como estão associados os capacitores C_1 e C_2 ? E os capacitores C_3 e C_4 ?
 - Qual o tipo de ligação entre o conjunto C_1 e C_2 e o conjunto C_3 e C_4 ?
 - Qual é o nome dado à associação de capacitores mostrada no diagrama?
10. Orientando-se pela solução do exemplo resolvido nesta secção e considerando a associação apresentada no diagrama do exercício anterior, na qual temos $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 4,0 \mu\text{F}$, determine:
- A capacitância equivalente da associação.
 - A carga armazenada no capacitor equivalente à associação.

F.3. Energia em um capacitor

UM CAPACITOR ARMAZENA ENERGIA

Consideremos um capacitor carregado com uma carga Q , apresentando uma voltagem V_{AB} entre suas armaduras (fig. F-13-a). Se ligarmos estas armaduras por um condutor (fig. F-13-b), o capacitor se descarregará. Esta descarga provocará um aquecimento no condutor e, muitas vezes, quando a voltagem V_{AB} é muito alta, a descarga vem acompanhada de uma faísca que salta entre os extremos do condutor e a armadura. Haverá, pois, manifestação de energia sob a forma de calor, luz ou som (estalido que costuma acompanhar a faísca).

Portanto, quando o capacitor se descarrega, há liberação de uma certa quantidade de energia, o que já podia ser esperado, pois neste processo há transporte de carga elétrica entre dois pontos (as placas do capacitor) que apresentam uma diferença de potencial. Esta energia encontrava-se, então, armazenada no capacitor e foi fornecida pela bateria enquanto o aparelho estava sendo carregado por ela. De fato, quando o capacitor é ligado à bateria (para ser carregado), esta retira cargas negativas de uma placa (que fica carregada positivamente) e fornece quantidade igual de cargas negativas à outra placa (que se carrega negativamente). Neste processo, a bateria tem de realizar um trabalho que é responsável pelo armazenamento de energia no capacitor.

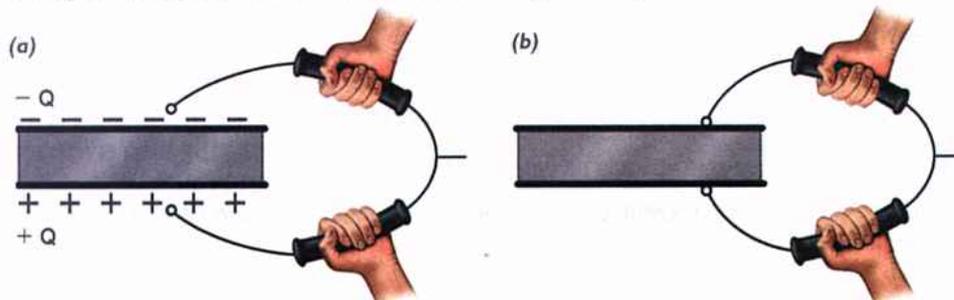


Fig. F-13: Um capacitor carregado se descarrega quando suas armaduras são ligadas por um condutor.

COMO CALCULAR A ENERGIA NO CAPACITOR

Quando uma carga elétrica Q é transportada entre dois pontos cuja diferença de potencial V_{AB} é mantida constante, o trabalho realizado no transporte é dado por $T = QV_{AB}$. Na descarga do capacitor, porém, a diferença de potencial entre as armaduras não se mantém constante. À medida que a carga é transportada de uma placa para outra, a diferença de potencial vai diminuindo, passando do valor inicial V_{AB} para um valor final nulo. Neste caso, não podemos usar a expressão citada para calcular o trabalho no processo da descarga. Pode-se mostrar (realizando cálculos matemáticos que não vamos desenvolver) que este trabalho é dado pela expressão:

$$T = \frac{1}{2} QV_{AB}$$

Evidentemente, o trabalho realizado pela bateria ao carregar o capacitor será dado pela mesma expressão e a energia potencial armazenada no capacitor terá também este valor. Isto é:

$$E = \frac{1}{2} QV_{AB}$$

Como já sabemos que $C = Q/V_{AB}$, podemos expressar esta energia em função de C e V_{AB} (substituindo Q por CV_{AB}):

$$E = \frac{1}{2} CV_{AB}^2$$

ou, em função de C e Q (substituindo V_{AB} por Q/C):

$$E = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Podemos então destacar:

um capacitor carregado com carga Q , apresentando entre as armaduras uma voltagem V_{AB} , armazena energia que é liberada na sua descarga. Esta energia é igual ao trabalho realizado pela bateria no processo de carga do capacitor e é fornecida pela relação

$$E = \frac{1}{2} QV_{AB}$$

Exemplo

Um capacitor plano, carregado, mas desligado da bateria, tem uma capacitância $C = 9,0 \mu\text{F}$, havendo entre suas armaduras uma diferença de potencial $V_{AB} = 200 \text{ V}$.

a) Qual a energia que será liberada na descarga deste capacitor?

Sabemos que a energia liberada por um capacitor ao ser descarregado (igual à energia que ele armazena) é dada pela relação

$$E = \frac{1}{2} QV_{AB}$$

Temos $V_{AB} = 200$ V e o valor de Q pode ser calculado, pois $Q = CV_{AB}$.

Como $C = 9,0 \mu\text{F} = 9,0 \times 10^{-6}$ F vem:

$$Q = 9,0 \times 10^{-6} \times 200 \quad \text{ou}$$

$$Q = 1,8 \times 10^{-3} \text{ C}$$

Então, a energia procurada é

$$E = \frac{1}{2} QV_{AB} = \frac{1}{2} \times 1,8 \times 10^{-3} \times 200 \quad \text{ou}$$

$$E = 0,18 \text{ J}$$

b) Afastando-se uma armadura da outra, de modo a triplicar a distância entre elas, qual será a nova energia que o capacitor armazenará?

Evidentemente, devemos usar a mesma expressão $E = (1/2) QV_{AB}$, para calcular esta energia. A carga Q não sofreu alteração e, portanto

$$Q = 1,8 \times 10^{-3} \text{ C}$$

Entretanto, sendo $C \propto 1/d$, quando a distância entre as armaduras for triplicada, a capacitância ficará dividida por 3. Logo, a nova capacitância será

$$C' = \frac{C}{3} = \frac{9,0 \times 10^{-6}}{3} \quad \text{ou} \quad C' = 3,0 \times 10^{-6} \text{ F}$$

Conseqüentemente, teremos nova voltagem nas placas, pois $V_{AB} = Q/C$. Como Q não variou e C tornou-se 3 vezes menor, teremos, para a voltagem, um valor 3 vezes maior. A nova voltagem V'_{AB} será, portanto:

$$V'_{AB} = 200 \times 3 \quad \text{ou} \quad V'_{AB} = 600 \text{ V}$$

Então, a nova energia E' armazenada no capacitor será:

$$E' = \frac{1}{2} QV'_{AB} = \frac{1}{2} \times 1,8 \times 10^{-3} \times 600 \quad \text{ou} \quad E' = 0,54 \text{ J}$$

c) Qual o trabalho que foi realizado no afastamento das armaduras do capacitor?

O trabalho realizado no afastamento das armaduras foi transferido para o capacitor que, por isso, teve sua energia aumentada. Então, tendo em vista o princípio de conservação da energia, este trabalho será igual ao aumento de energia no capacitor, isto é

$$T = E' - E = 0,54 - 0,18 \quad \text{ou} \quad T = 0,36 \text{ J}$$

s de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

11. Um capacitor, carregado com uma carga de $2,8 \times 10^{-3}$ C, apresenta entre suas armaduras uma diferença de potencial $V_{AB} = 500$ V.
 - a) Qual a energia armazenada neste capacitor?
 - b) Qual foi o trabalho realizado para carregar este capacitor?

12. Ligando-se as armaduras do capacitor do exercício anterior por meio de um fio, ele se descarregará. Qual será, em calorías, a quantidade de calor que será desenvolvida neste fio? (Considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$.)
13. Mantendo o capacitor mencionado no exercício 11 desligado da bateria, afastamos suas armaduras, de modo que a distância entre elas se torne 2 vezes maior.
- Haverá realização de trabalho neste afastamento?
 - Então, a energia do capacitor aumentará, diminuirá ou não se alterará?
14. Quando as armaduras do capacitor são afastadas, como foi mencionado no exercício 13, responda:
- A carga, Q , distribuída nas placas do capacitor, aumenta, diminui ou não se altera?
 - A capacitância do capacitor aumenta, diminui ou não se altera?
 - Qual será, então, a nova diferença de potencial entre as placas?
15. a) Qual será o novo valor da energia armazenada nas placas do capacitor do exercício 13?
 b) Este resultado confirma a resposta que você deu à questão (b) do exercício 13?
16. Dobrando-se o valor da voltagem aplicada a um capacitor, dizer o que ocorre com:
- Sua capacitância.
 - A carga nas placas.
 - A energia armazenada no capacitor.

isã reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão reVisã

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste apêndice. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Diga com suas palavras o que é um capacitor.
 - O que são as armaduras de um capacitor?
 - Faça um desenho de um capacitor plano.
 - Indique a figura deste capítulo que apresenta um capacitor cilíndrico.
 - Mostre como os capacitores são representados em diagramas elétricos.
- Escreva a equação que define a capacitância de um capacitor. Explique o significado de cada um dos símbolos que aparecem nesta equação.
 - Qual é, no S.I., a unidade de capacitância?
- Qual é a relação entre a capacitância de um capacitor e a área de suas armaduras?
 - E entre a capacitância e a distância entre as armaduras?
 - Explique o que é um capacitor variável.
- Um capacitor plano carregado, tendo o ar como dielétrico, está desligado da bateria. Introduzindo-se entre suas armaduras um isolante cuja constante dielétrica é K , dizer o que ocorre com:

 - A carga nas armaduras.
 - O campo elétrico entre as armaduras.
 - A voltagem entre as armaduras.
 - A capacitância do capacitor.
- Faça um desenho mostrando três capacitores ligados em paralelo a uma bateria.
 - Em qual deles está aplicada a maior voltagem?
 - Em qual deles está armazenada a maior carga?
 - Escreva a equação que fornece a capacitância equivalente desta associação.
- Faça um desenho mostrando três capacitores ligados em série a uma bateria.
 - Em qual deles está armazenada a maior carga?
 - Em qual deles está aplicada a maior voltagem?
 - Escreva a equação que fornece a capacitância equivalente desta associação.
- Na secção A.3 foram feitas algumas observações que nos permitem concluir que um capacitor armazena energia. Descreva com suas palavras estas observações.
 - Escreva a expressão que nos fornece a energia armazenada em um capacitor. Explique o significado de cada símbolo que aparece nesta expressão.

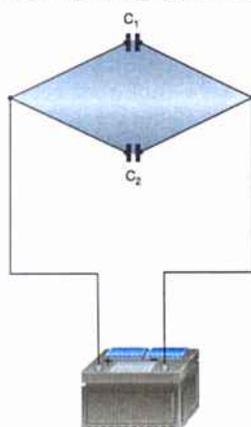
Problemas e testes problemas e testes problemas e tes

1. Em um capacitor plano, de capacitância $C = 4,0 \mu\text{F}$, a distância entre as armaduras é $d = 1,5 \text{ mm}$ e o campo elétrico entre elas vale $E = 2,0 \times 10^5 \text{ N/C}$. Calcule:

- a) A diferença de potencial entre as armaduras.
- b) A carga armazenada no capacitor.

2. Dois capacitores, de capacitâncias C_1 e C_2 , estão ligados a uma bateria da maneira mostrada na figura deste problema. Sejam V_1 e V_2 as voltagens entre as placas destes capacitores e Q_1 e Q_2 as cargas adquiridas por eles. Sabendo-se que $C_1 > C_2$ assinale, entre as alternativas seguintes, aquela que está *correta*:

- a) $V_1 > V_2$ e $Q_1 = Q_2$
- b) $V_1 < V_2$ e $Q_1 = Q_2$
- c) $V_1 = V_2$ e $Q_1 > Q_2$
- d) $V_1 < V_2$ e $Q_1 < Q_2$
- e) $V_1 > V_2$ e $Q_1 < Q_2$



Problema 2.

3. Um capacitor plano está carregado e suas armaduras estão desligadas da bateria. Suponha que reduzíssemos a distância entre as armaduras. Nestas condições assinale, entre as afirmativas seguintes, aquela que está *errada*:

- a) A voltagem entre as armaduras diminui.
- b) A capacitância do capacitor aumenta.
- c) A carga nas armaduras não varia.
- d) A energia armazenada no capacitor aumenta.

4. Um capacitor plano, com ar entre as armaduras, está desligado da bateria. Supondo que este capacitor tenha sido totalmente mergulhado na água, assinale, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão *corretas*:

- a) A carga nas armaduras não se altera.
- b) O campo elétrico entre as armaduras diminui.
- c) A voltagem entre as armaduras diminui.
- d) A capacitância do capacitor aumenta.
- e) A energia armazenada no capacitor diminui.

5. No problema anterior, suponha que as armaduras do capacitor tenham permanecido ligadas à bateria quando ele foi introduzido na água. Nes-

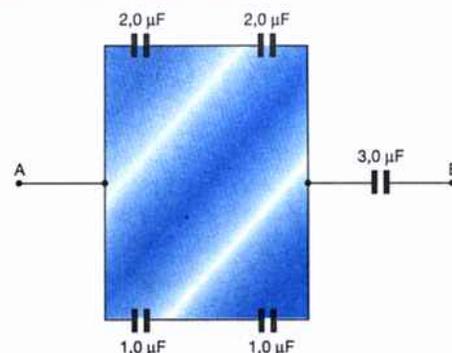
tas condições, quais são as afirmativas apresentadas naquele problema que estão *corretas*?

6. Verifica-se que um capacitor adquire uma carga de $3,0 \mu\text{C}$ quando é ligado a uma certa bateria. Suponha que dois capacitores, idênticos a ele, sejam ligados a esta mesma bateria. Dizer qual será a carga armazenada na associação destes dois capacitores nos seguintes casos:

- a) Eles foram associados em paralelo.
- b) Eles foram associados em série.

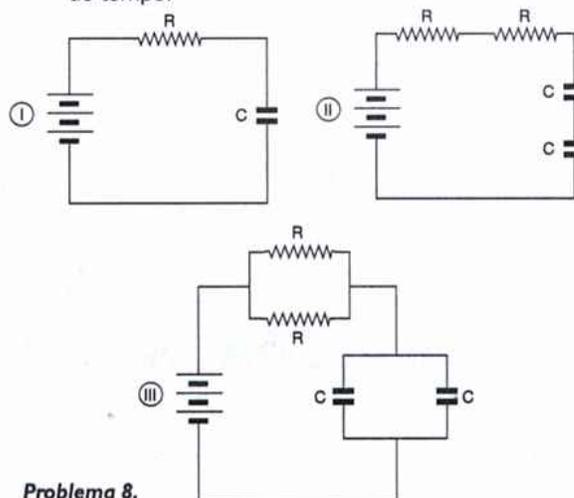
7. Na figura deste problema, uma diferença de potencial $V_{AB} = 200 \text{ V}$ foi aplicada entre os pontos A e B. Determine:

- a) A capacitância equivalente da associação.
- b) A carga total armazenada na associação.



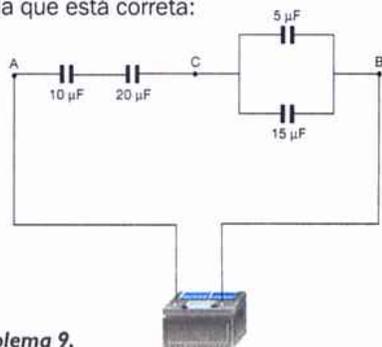
Problema 7.

8. Denomina-se constante de tempo de um circuito elétrico o produto RC , onde R é a resistência total do circuito e C é sua capacitância total. Analise os três circuitos mostrados na figura deste problema e indique aqueles que possuem a mesma constante de tempo.



Problema 8.

9. Analise o circuito apresentado na figura deste problema e assinale, entre as afirmativas seguintes, aquela que está correta:

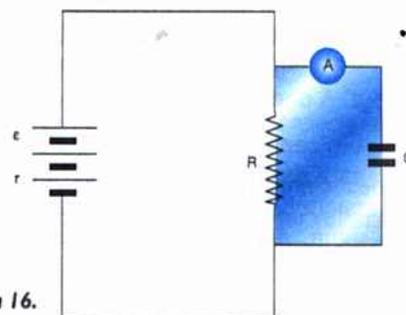


Problema 9.

- a) A voltagem entre A e C é menor do que entre C e B.
 b) A carga do capacitor de $10 \mu\text{F}$ é menor do que no de $20 \mu\text{F}$.
 c) A voltagem no capacitor de $5 \mu\text{F}$ é menor do que no de $15 \mu\text{F}$.
 d) A energia armazenada no capacitor de $5 \mu\text{F}$ é maior do que no de $15 \mu\text{F}$.
 e) A energia armazenada no capacitor de $10 \mu\text{F}$ é maior do que no de $20 \mu\text{F}$.
10. Dois capacitores idênticos, com ar entre as armaduras, estão ligados em paralelo, apresentando uma capacitância total C_0 . Se estes capacitores forem ligados em série e mergulhados em um líquido isolante, de constante dielétrica $K = 4$, qual será a capacitância final da associação?
11. Uma nuvem eletrizada está situada a 200 m de altura, paralelamente à superfície da Terra, formando com esta superfície um capacitor plano de $0,50 \mu\text{F}$. Quando o campo elétrico no ar (entre a nuvem e a Terra) atinge o valor de $3,0 \times 10^8 \text{ N/C}$, observa-se a ocorrência de um relâmpago. Calcule a quantidade de carga elétrica que se encontrava acumulada na nuvem naquele instante.
12. No problema anterior, determine a quantidade de energia que é liberada na descarga elétrica, isto é, no ralo que salta da nuvem para a Terra.
13. Três capacitores, $C_1 = 1,0 \mu\text{F}$, $C_2 = 1,5 \mu\text{F}$ e $C_3 = 3,0 \mu\text{F}$, foram fabricados para suportar uma voltagem de até 200 V sem "dar fuga", isto é, sem que o dielétrico se torne condutor,

permitindo que o capacitor se descarregue através dele. Estes capacitores foram associados e esta associação foi ligada a uma bateria de 300 V. Dizer quais os capacitores que "darão fuga" supondo que eles tenham sido associados:

- a) Em paralelo. b) Em série.
14. A voltagem entre as placas de um capacitor de $6,0 \mu\text{F}$ é 200 V. Liga-se cada uma das armaduras deste capacitor às armaduras de um outro capacitor de $3,0 \mu\text{F}$, inicialmente descarregado. Calcule:
- a) A energia inicialmente armazenada no primeiro capacitor.
 b) A energia armazenada na associação dos dois capacitores.
 c) A energia dissipada em virtude da ligação.
15. Um capacitor de sintonização de um rádio tem capacitância máxima de $2,0 \times 10^{-7} \text{ F}$. Pela rotação das placas móveis, sua capacitância pode ser reduzida a $2,0 \times 10^{-8} \text{ F}$. Uma voltagem de 300 V é aplicada ao capacitor quando ele está com o máximo de capacitância. A fonte de tensão é, em seguida, desligada do capacitor e o botão de sintonia é girado até ser atingido o mínimo de capacitância. Calcular o trabalho realizado para girar este botão de sintonia.
16. No circuito mostrado na figura deste problema a f.e.m. da bateria vale $\epsilon = 10 \text{ V}$ e sua resistência interna é $r = 1,0 \Omega$. Sendo $R = 4,0 \Omega$ e $C = 2,0 \mu\text{F}$ e sabendo que o capacitor já se encontra totalmente carregado, responda:
- a) Qual é a indicação do amperímetro A?
 b) Qual é a carga armazenada no capacitor?



Problema 16.

capítulo 25

A Nova Física

Chris Butler/SPL/Stock Photos



Galáxia em espiral que os astrônomos identificam como NGC 5194 e sua companheira menor, de forma irregular, identificada como NGC 5195 (rebaixada, sob o título Nova, no alto). Esta bela fotografia foi obtida graças aos modernos equipamentos do telescópio espacial Hubble.

25.1. Uma visão panorâmica

Em nosso curso já tivemos oportunidade de abordar alguns aspectos da Física e tecnologias modernas. Neste texto pretendemos apresentar, de maneira bem simples e resumida, uma visão de conjunto da Física que se desenvolveu nas últimas décadas do século XX e que, certamente, concentrará as atenções dos cientistas ainda por muito tempo. Entrando em contato com esta “Nova Física” poderá ocorrer que você se sinta motivado a dar continuidade a seus estudos neste fascinante campo do conhecimento ou a participar como cidadão esclarecido, no direcionamento do desenvolvimento científico, contribuindo com os cientistas, para que seu rumo prioritário — a melhoria das condições de vida de toda a humanidade — seja sempre mantido.

O QUE É A NOVA FÍSICA

As idéias da Teoria da Relatividade e da Teoria Quântica integram o campo da Física denominado geralmente *Física Moderna* ao qual já nos referimos em vários temas abordados em nosso curso de Física. Entretanto, a Nova Física, à qual estamos agora nos reportando, apesar de ter sua estrutura desenvolvida a partir daquelas teorias, vai muito além delas. Ela introduz uma explosão de novas idéias, envolvendo avanços tanto de caráter conceituais como práticos, constituindo-se em uma verdadeira revolução nesta área. Essa revolução não se restringe a um determinado ramo bem definido desta ciência, como costumava ocorrer na evolução da Física. Ela é, ao contrário, muito abrangente, relacionando-se com tópicos diversos, tais como a Cosmologia, a Física de Partículas, a Física dos Materiais etc. Assim, o universo inteiro, dos menores fragmentos de matéria aos enormes conjuntos de galáxias, estendendo-se aos estranhos comportamentos de materiais diversos, inclusive das células vivas, torna-se objeto de estudo desta Nova Física (fig. 25-1).

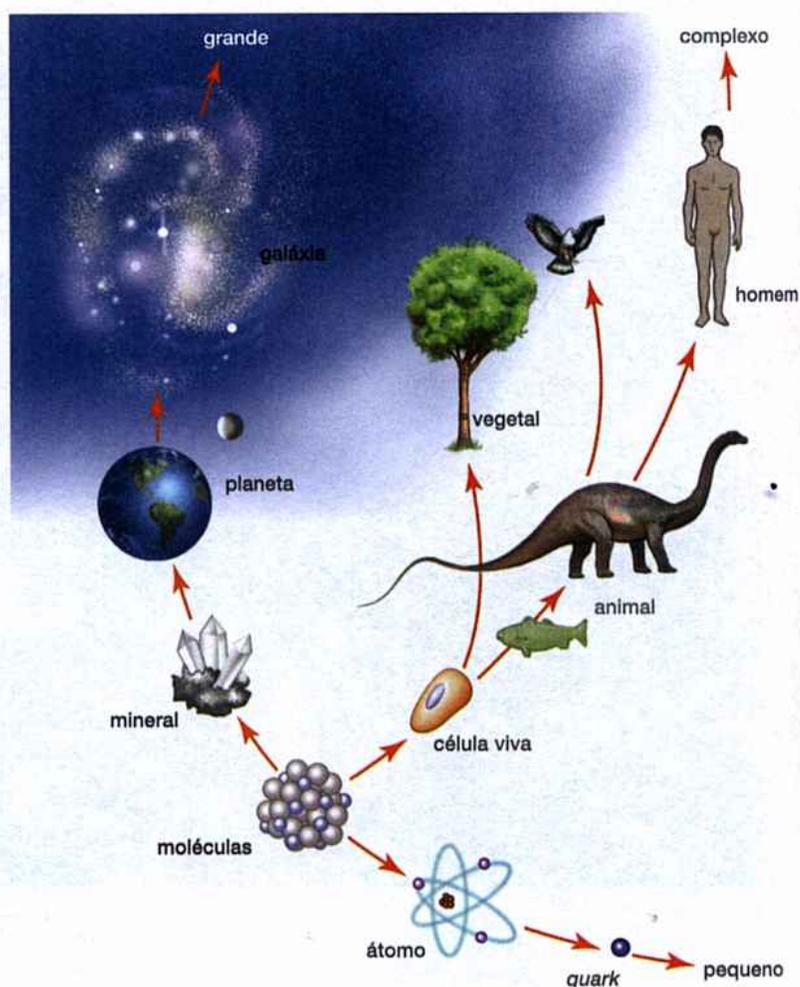


Fig. 25-1: As atenções dos físicos no século XXI estarão voltadas para três grandes áreas desta ciência: a Cosmologia, a Física de Partículas (também conhecida como Física de Altas Energias) e a Física das Estruturas Complexas (abrangendo a Física da Matéria Condensada, a Biofísica, a Física dos Novos Materiais e a Física do Caos).

25.2. O mundo do muito pequeno – Quais são as partículas elementares

Como vimos, a palavra *átomo* significa “indivisível” (ver Tópico Especial do capítulo 11), mas, na realidade, desde a descoberta do elétron, no final do século XIX, sabe-se que o átomo é constituído de várias outras partículas, em uma associação muito complexa, representando, na verdade, um pequeno mundo em si próprio (ver fig. 25-2). As descobertas do próton e do nêutron (assunto abordado no Tópico Especial do capítulo 9) mostraram que o próprio núcleo também é divisível. Assim, os conhecimentos sobre o átomo em meados do século XX apresentavam-no como possuindo uma estrutura complexa, e as forças nucleares fortes e fracas, que se manifestam entre as partículas que o constituem, não eram bem compreendidas (veja o final da secção 24.5).

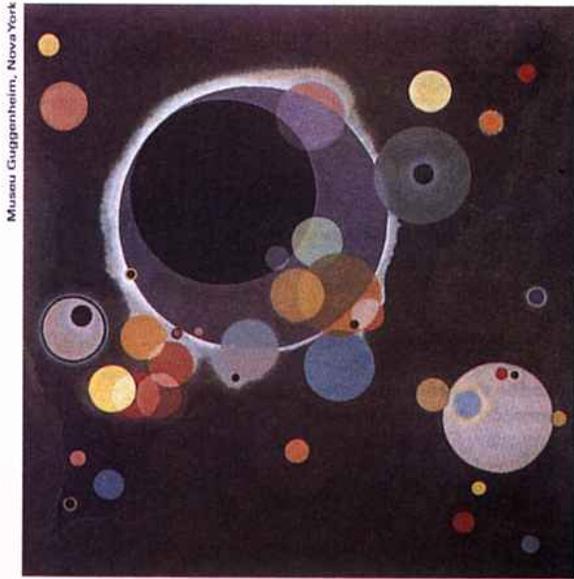


Fig. 25-2: Esta bela tela de Vassily Kandinsky, conservada no Museu Guggenheim, de Nova York, foi selecionada pelos organizadores do projeto *Dança do Universo* para ilustrar uma visão da constituição atômica da matéria. Observação: Neste projeto, que foi desenvolvido para divulgação das idéias relacionadas com a Física de Partículas, foi criada uma exposição itinerante com reproduções de obras de arte moderna para ilustrar conceitos científicos da atualidade. Esta proposta dos organizadores da exposição foi feita supondo haver, sempre, uma ligação entre a arte e a ciência de uma determinada época.

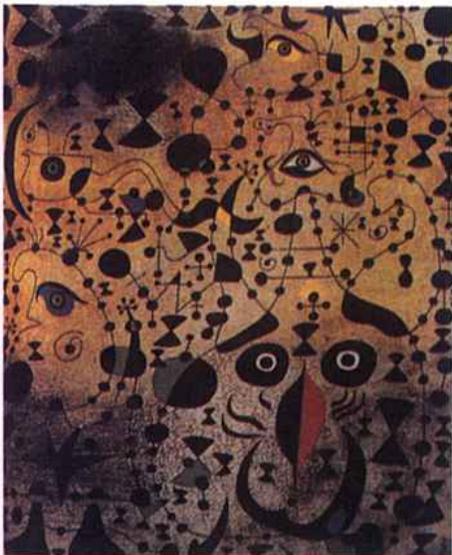


Fig. 25-3: Tela de Juan Miró, encontrada no Museu de Arte Moderna de Nova York, também incluída na exposição *Dança do Universo*, escolhida para ilustrar o grande número de partículas, em princípio consideradas elementares, que, na primeira metade do século XX, se supunha constituir a matéria presente no universo.

A grande força que mantinha os prótons e nêutrons unidos no núcleo também não era explicada. Em 1935, o físico japonês H. Yukawa apresentou uma teoria na qual a existência desta força era atribuída à ação de uma partícula para a qual ele propôs a denominação *méson*. Entretanto, só em 1947 a existência desta partícula foi comprovada, sendo o físico brasileiro Cesar Lattes um dos cientistas que colaborou nessa importante façanha (ver capítulo 22).

Muitas outras partículas foram sendo previstas e detectadas, tais como os neutrinos, os pósitrons, novos tipos de méson e outras antipartículas (antiprótons, antinêutrons etc.), chegando a serem detectadas centenas de partículas (fig. 25-3). A crença, geralmente aceita, de que a natureza não poderia ser tão complexa e que os constituintes básicos da matéria não poderiam ser tão numerosos, conduziu a Física de Partículas a uma situação caótica, sem que os cientistas pudessem concluir quais entre aquelas centenas de partículas conhecidas seriam realmente elementares, isto é, quais seriam de fato indivisíveis e estariam presentes nas estruturas das demais. Atualmente, a situação já está completamente mudada e, ao que tudo indica, há evidências suficientes para se chegar àquela conclusão. É possível mostrar, pelas reações que ocorrem nos aceleradores de partículas (veja Tópico Especial do capítulo 22), que muitas daquelas partículas, supostas anteriormente elementa-

res, são constituídas pela associação de outras. Por exemplo, o próton, o nêutron e outras partículas pesadas, denominadas genericamente *hádrons*, apresentam uma estrutura interna composta de outras, mais leves e realmente elementares, denominadas *quarks*. Além dos *quarks*, os *léptons* (denominação genérica das partículas leves), tais como o elétron, o pósitron, o neutrino e outras, são também partículas elementares, isto é, não possuem estrutura e são indivisíveis.

A Física de Partículas (ou Física da Alta Energia) é, provavelmente, o ramo mais espetacular da Nova Física. As pesquisas são realizadas com o auxílio de enormes aceleradores cada vez mais possantes (veja Tópico Especial do capítulo 22 e fig. 25-4), cuja construção exige recursos fabulosos, os quais, de maneira geral, não têm condições de serem levantados por um só país. Demandando o envolvimento de várias nações, em um grau de colaboração que não era usual no desenvolvimento da ciência (até então as pesquisas científicas eram realizadas pelos pesquisadores de um dado país em seus próprios laboratórios), cada experiência é realizada por centenas de físicos, engenheiros e técnicos que se associam durante vários anos.

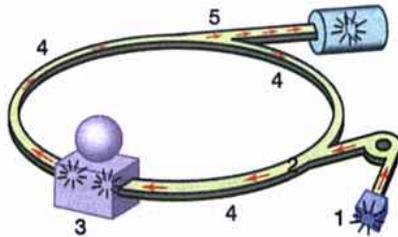


Fig. 25-4: Em um acelerador de partículas são desenvolvidas altíssimas energias (são acelerados milhões de prótons ou elétrons até atingirem velocidades próximas da velocidade da luz). As partículas aceleradas são usadas para bombardear outras partículas, originando-se destes violentos choques novas partículas. No esquema de um acelerador de prótons, mostrado na figura, vemos: (1) preparação dos prótons; (2) injeção de prótons no anel acelerador; (3) aceleração de prótons pela aplicação de uma voltagem; (4) após o próton efetuar milhões de voltas pelo anel ele é ejetado; (5) partículas-alvo a serem bombardeadas pelo próton a alta velocidade.

NO INTERIOR DOS HÁDRONS

Conforme dissemos, os *hádrons* não são partículas elementares, mas os *léptons* não apresentam estrutura interna, comportando-se, praticamente, como pontos materiais. O físico americano Murray Gell-Mann, em 1963, propunha uma teoria na qual os *hádrons* eram apresentados como partículas compostas, em cuja estrutura eram encontradas partículas elementares ainda desconhecidas, com uma característica totalmente inédita: sua carga elétrica seria uma fração da carga do elétron ou do próton. A essas partículas Gell-Mann denominou *quarks*, quase como se fosse uma brincadeira, já que a palavra foi retirada da obra *Finnegans Wake* do escritor James Joyce, com significado restrito apenas àquele trabalho (de maneira geral as denominações dadas às partículas constituintes da matéria eram derivadas de palavras gregas ou latinas, relacionadas com alguma propriedade destas partículas). Apesar destas circunstâncias, a denominação proposta por Gell-Mann foi bem aceita e passou, rapidamente, a ser adotada sem restrições, estando hoje consagrada universalmente. Algumas das previsões de Gell-Mann, referentes à existência de estrutura nos *hádrons*, foram confirmadas e em 1969 ele recebeu o Prêmio Nobel de Física por seus trabalhos. Mais de uma espécie de *quark* teve de ser prevista (ao todo 12) para que, agrupando-os convenientemente, fosse possível montar a estrutura dos inúmeros *hádrons* e de outras partículas não-ele-

mentares conhecidas naquela ocasião. Na tabela 25-1 você poderá identificar estes tipos de *quarks* e suas principais propriedades. Observe ali a característica dos *quarks*, já mencionada: o valor da carga elétrica de cada um é uma fração da carga elétrica elementar (carga do elétron).

Quarks			
Nome	Símbolo	Massa em GeV/c ²	Carga
Up	u	4×10^{-3}	2/3
Down	d	7×10^{-3}	-1/3
Charm	c	1,5	2/3
Strange	s	0,15	-1/3
Top	t	> 89	2/3
Bottom	b	4,7	-1/3

Tabela 25-1.

Observação:

- 1) Para cada uma dessas partículas existe sua correspondente antipartícula.
- 2) A unidade de carga usada é a carga do elétron, representada pela letra e, com o valor $e = -1$ carga elementar.

Léptons			
Nome	Símbolo	Massa em GeV/c ²	Carga
Elétron	e	$5,1 \times 10^{-4}$	-1
Múon	μ	0,106	-1
Tau	τ	1,784	-1
Neutrino do elétron	ν_e	$< 2 \times 10^{-8}$	0
Neutrino do múon	ν_μ	$< 3 \times 10^{-4}$	0
Neutrino do tau	ν_τ	$< 4 \times 10^{-2}$	0

Tabela 25-2.

Observação: Para cada uma dessas partículas existe sua correspondente antipartícula.

Com a proposta desses diversos tipos de *quarks*, é possível combiná-los para obter a estrutura de todas as partículas (pesadas e médias) conhecidas. Por exemplo, para obter a estrutura de um próton deve-se lançar mão de dois *quarks* u e um *quark* d, originando uma carga total $(2/3) + (2/3) + (-1/3) = 1$ como era esperado (fig. 25-5). Por sua vez um nêutron seria constituído por um *quark* u e dois *quarks* d, sendo então sua carga total $(2/3) + (-1/3) + (-1/3) = 0$ (veja a fig. 25-6).

Embora não tenha sido possível, ainda, observar isoladamente um *quark*, há várias evidências indiretas de sua real existência e a teoria de Gell-Mann é aceita universalmente. Espera-se que no início do século XXI, contando com recursos experimentais mais sofisticados, os cientistas possam comprovar definitivamente a adequação da teoria dos *quarks* para descrever a estrutura da matéria.

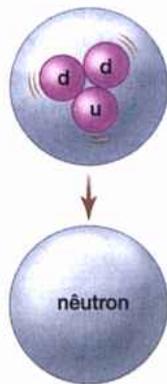


Fig. 25-6: A estrutura de um nêutron é, provavelmente, constituída por um quark up e dois down.



Coleção Particular

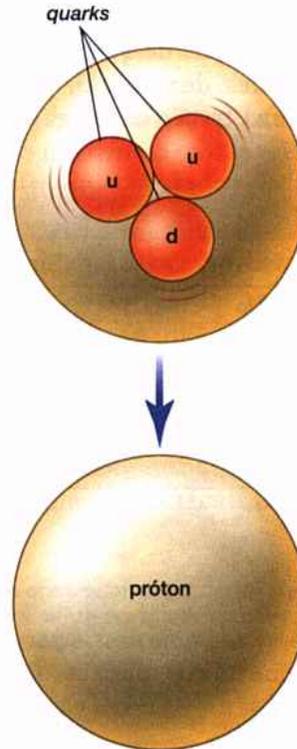


Fig. 25-5: A estrutura de um próton, provavelmente, é constituída por dois quarks up e um quark down.

Fig. 25-7: Tela de Robert Delaunay, de uma coleção particular, selecionada no projeto Dança do Universo, para ilustrar os três quarks presentes nas estruturas tanto dos prótons quanto dos nêutrons.

Atualmente, entretanto, já se pode prever que em cada próton e em cada nêutron os *quarks* se chocam constantemente, deslocando-se com velocidade próxima da velocidade da luz. A tais velocidades ocorrem fenômenos pouco comuns no mundo macroscópico, para a descrição dos quais os cientistas precisam lançar mão da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade. A energia se transforma em matéria nos choques de incrível violência entre os *quarks* e surge então um novo *quark*, e um *antiquark* (ver questão de texto sobre antimatéria). Por sua vez, quando essas partículas se encontram, ambas desaparecem, transformando-se em energia. Assim, os *quarks* e *antiquarks* aparecem, se encontram e desaparecem sem cessar, mas, curiosamente, neste caos reina uma certa ordem: há sempre três *quarks* tanto na estrutura do próton quanto na do nêutron.

25.3. o mundo do muito grande

A NOVA TEORIA GRAVITACIONAL

Como vimos no capítulo 6, ao estabelecer a Lei da Gravitação Universal, Newton usou as determinações das órbitas dos planetas do Sistema Solar como atividades de laboratório para comprovar suas idéias. Atualmente, essas idéias

encontram-se bastante alteradas e ampliadas pela teoria da gravitação proposta por Einstein, em 1915, conhecida como Teoria da Relatividade Geral (ver referência no Tópico Especial do capítulo 5, volume 1). É com base nesta teoria que, ainda hoje, os cientistas interpretam os fenômenos que ocorrem não só no Sistema Solar, mas em todo o universo. O laboratório da teoria gravitacional tornou-se, pois, muito mais abrangente, envolvendo distâncias fantásticas e novos objetos astronômicos, tais como buracos negros, estrelas de nêutrons, galáxias e quasares. Os enormes avanços observados na construção dos telescópios, na eletrônica moderna, nos computadores e nos vôos espaciais transformaram as pesquisas referentes à gravitação, confinadas até então quase exclusivamente a estudos teóricos, em um enorme empreendimento experimental. Neste campo, uma das idéias que vem despertando grande atenção é a busca de uma *radiação gravitacional*, isto é, da existência de ondas gravitacionais que seriam emitidas pela matéria (de maneira semelhante à emissão de ondas eletromagnéticas pelas cargas elétricas). Tudo indica que a preocupação em verificar a existência dessas radiações gravitacionais será um dos principais objetos da pesquisa no campo da Nova Física no início do século XXI, abrindo, assim, uma nova e ampla janela para o conhecimento do universo.



Tony Stone/Getty Images

Fig. 25-8: O telescópio espacial de Hubble, da NASA (nome dado em homenagem ao astrônomo que conseguiu perceber que o universo está em expansão). O Hubble foi lançado em abril de 1990, planejado para permanecer em órbita durante 20 anos, realizando no espaço observações óticas e ultravioletas, visando fornecer dados às pesquisas realizadas pelos astrofísicos.

O DESENVOLVIMENTO DA COSMOLOGIA

A estrutura e a evolução do universo é objeto de estudo da *Cosmologia* (cosmos = universo + logos = estudo). Desde os tempos da antiga Grécia esse tema era uma preocupação dos filósofos, situando-se em posição de destaque dentro do campo da chamada *Filosofia Natural*. Entretanto, nos últimos três séculos a Cosmologia vinha se apresentando como um ramo de pouca importância da teoria da gravitação, com objetivos meramente especulativos. Duas grandes descobertas modificaram completamente esta situação. A primeira, ocorrida no final da década de 20, foi a constatação do astrônomo E. Hubble (fig. 25-8) de que o universo está em expansão (ver Tópico Especial do capítulo 16). Isto conduz à idéia de que o universo teve um começo e portanto ele tem uma idade finita. Daí surgiram as teorias sobre a origem do universo, assunto que, de maneira geral, era tratado em âmbito religioso. Entre estas teorias, a mais aceita é aquela que atribui esse início a uma *grande explosão*,



Fig. 25-9: Arno Penzias e Robert Wilson posam em frente à antena com a qual detectaram, acidentalmente, as microondas de fundo (radiações térmicas que teriam se originado no big-bang).

conhecida pela expressão inglesa “big-bang”. A segunda descoberta mencionada ocorreu em 1965, quando dois cientistas, Robert Wilson e Arno Penzias, verificaram a existência de uma radiação cósmica, que parece circundar o universo desde sua criação e que se acredita tenha sido originada por ocasião do *big-bang*. O fato de esta radiação ser considerada um “eco” (fig. 25-9) que vem sendo transmitido há cerca de vinte bilhões de anos (idade do universo) é aceito como uma evidência de que o *big-bang* realmente ocorreu.

ADS

ORIGEM DO UNIVERSO — BIG-BANG

Segundo a teoria do *big-bang* procura-se descrever o que teria ocorrido logo após a grande explosão, com base nos conhecimentos atuais da Física. Até 10^{-45} s após a explosão inicial, a temperatura seria tão alta e a densidade de energia, tão elevada que os cientistas não se arriscam a formular hipóteses sobre o que teria ocorrido neste intervalo de tempo. Entretanto, o universo se resfriou rapidamente e, após uma pequena fração de segundo, o que havia seria um mar de *quarks* em estado livre. Um milionésimo de segundo após, os *quarks* começaram a se agrupar para formar os hádrons.

Quando o universo atingiu a idade de três minutos, os núcleos atômicos mais simples começaram a se formar. Centenas de milhares de anos depois, os elétrons começaram a circular em torno dos núcleos, originando os primeiros átomos. Em seguida deu-se o início da condensação da matéria em determinadas regiões, de maneira não uniforme, constituindo as estrelas e galáxias (fig. 25-10). O universo tomava a forma com a qual é conhecido hoje. Desde a grande explosão até os nossos dias, os cientistas chegaram à conclusão de que devem ter decorrido cerca de 20 bilhões de anos (este valor foi obtido através de vários métodos)!

Há ainda muitos mistérios a serem decifrados sobre este imenso campo de estudo: como era o universo antes do *big-bang*, maiores evidências para aceitação desta teoria, como ocorreu de fato a evolução do cosmos e sua constituição atual, a existência de vida em outras galáxias, previsões sobre o futuro etc. Os cientistas contemporâneos e do século XXI terão muito trabalho pela frente...



Fig. 25-10: Tela de Mark Tobey, selecionada pelos organizadores da exposição *Dança do Universo*, para ilustrar as partículas que formam o universo e as forças que as unem.

25.4. O mundo das estruturas complexas

OUTRA DIREÇÃO NO CAMPO DE ESTUDO DA FÍSICA

Como mencionamos anteriormente, o universo totalmente constituído apenas de partículas muito pequenas, logo após o *big-bang*, foi se organizando de modo cada vez mais complexo: do caos inicial às partículas elementares, destas aos átomos, daí às moléculas e finalmente à vida, com o aparecimento dos organismos desenvolvidos. Os sistemas complexos só começaram a ser analisados sistematicamente pelos físicos há relativamente pouco tempo (fig. 25-11). Em grande parte, o aprofundamento deste estudo foi propiciado pelo desenvolvimento dos computadores eletrônicos. Foram esses equipamentos que tornaram possível a abor-

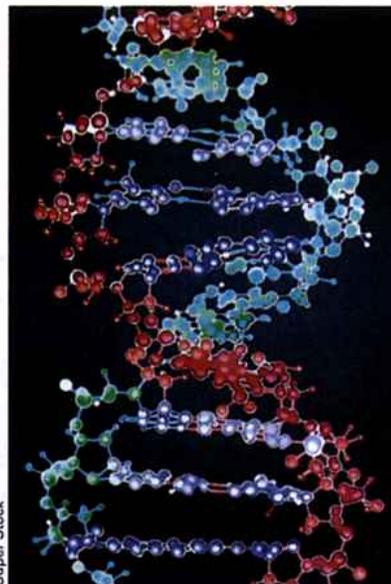


Fig. 25-11: Há um número incontável de fenômenos complexos ocorrendo em nosso cotidiano, ainda não bem analisados. As informações referentes aos organismos vivos, por exemplo, seu patrimônio genético, só começaram a ser mais bem compreendidas pelo estudo das macromoléculas de DNA (o conjunto destas moléculas forma o genoma, constituição genética total do indivíduo), cuja simulação, por meio de computador, é apresentada na figura.

dagem de problemas envolvendo um elevado número de parâmetros relacionados com estes sistemas, exigindo um tratamento matemático que só pôde ser concretizado após a invenção das grandes calculadoras. Evidentemente, muitos outros instrumentos, laboratórios sofisticados e técnicas avançadas são necessários às pesquisas neste campo e não é difícil perceber a enorme equipe de pessoas que colaboram nestas pesquisas.

Os físicos confessam, ainda hoje, seu desconhecimento sobre aspectos diversos do comportamento dos sistemas complexos, tais como flocos de neve, organismos vivos em geral, condições atmosféricas e do tempo etc. Por outro lado, eles nunca admitem que o estudo de qualquer um destes fenômenos esteja, em princípio, fora do domínio desta ciência. Alguns desses pesquisadores afirmam, com segurança, que qualquer fenômeno que ocorra na natureza poderá ser explicado pelas leis da Física, desde que sejam conhecidas as condições iniciais e de contorno em que ele ocorre, além das restrições a que está sujeito.

A TENDÊNCIA À AUTO-ORGANIZAÇÃO DOS SISTEMAS COMPLEXOS

Um dos aspectos intrigantes dos sistemas complexos é que eles podem apresentar comportamentos coerentes, envolvendo todo o organismo (como, por exemplo, as funções exercidas pelos órgãos do corpo humano), utilizando apenas forças naturais, que revelam extraordinária organização, realizando atividades altamente cooperativas.

Alguns exemplos de sistemas auto-organizados que vêm sendo pesquisados com insistência no campo da Física são: a supercondutividade (já abordada no capítulo 20), o *laser* (que também foi analisado no capítulo 24) e a superfluidez (sobre a qual falaremos mais adiante). O próprio fenômeno de convecção, que um líquido apresenta ao ser aquecido (veja capítulo 12, secção 12.2), é um exemplo de organização espontânea, na qual um grande número de moléculas movem-se em conjunto, como se estivessem obedecendo a um invisível comando.

Essa tendência para uma auto-organização da matéria e da energia foi ressaltada por Hilya Prigogine e seus colaboradores, que estudaram o comportamento dos sistemas afastados do equilíbrio termodinâmico: muitos destes sistemas, forçados a se afastarem da situação de equilíbrio, alcançam, repentina e espontaneamente, nova fase com alto grau de ordenamento. Estes fenômenos põem em dúvida o espírito da segunda lei da termodinâmica, que prevê para o universo uma tendência à desorganização, embora não apresentem uma contradição a ela, já que os sistemas auto-organizados são sempre abertos para suas vizinhanças. Assim, a ordenação dos sistemas pode ser justificada pelo aumento de entropia destas vizinhanças (ver apêndice C, vol. 2). Prigogine e seus colegas acreditam que, com estes trabalhos, eles iniciaram nada menos que uma mudança de paradigma neste campo do conhecimento.

Os fenômenos biológicos que são, certamente, os exemplos mais espetaculares de auto-organização e padronização dos sistemas complexos evidentemente já vêm sendo analisados pelos biólogos há muito tempo. Entretanto, só recentemente estes fenômenos passaram a ser pesquisados pelos físicos, dando origem a um ramo distinto da Nova Física. Muitos desses físicos acreditam que, no futuro, muitos fatos relacionados com a vida, ainda hoje mal descritos, serão desvendados e analisados com profundidade pela utilização dos processos desenvolvidos neste novo ramo.

O HÉLIO TOMADO COMO MODELO PARA O ESTUDO DE MATERIAIS COMPLEXOS E A SUPERFLUIDEZ DO HÉLIO LÍQUIDO

O estudo do comportamento do elemento hélio tem sido exemplar para a compreensão das propriedades fundamentais da matéria. O átomo de hidrogênio já é conhecido com profundidade, sendo possível calcular, praticamente, qualquer detalhe de seu comportamento. Entretanto, por ser um átomo muito simples, não pode ser tomado como modelo para o estudo de outros materiais, cujos átomos apresentam um número maior de partículas. O átomo de hélio, apresentando-se como um caso intermediário entre o hidrogênio e outros mais complexos, tem tido seu comportamento minuciosamente analisado pelos pesquisadores atuais e, há mais de 50 anos, situações simples deste comportamento vêm permitindo estudar melhor a Física dos Líquidos e dos Sólidos. Em outras palavras, o estudo do comportamento do hélio (principalmente do hélio líquido) tem colaborado para o desenvolvimento da Física da Matéria Condensada, que é um dos ramos importantes da Física Moderna e que, certamente, continuará a ter um enorme realce no campo da Nova Física. Através do estudo do hélio tem sido possível obter progressos e esclarecimentos referentes a vários fenômenos complicados, tais como as transições de fase da matéria (pontos críticos e mudanças de estado da ordenação dos átomos), formação das superfícies cristalinas, a evaporação e turbulência dos líquidos, a passagem de estados em que um líquido molha perfeitamente ou parcialmente uma superfície e o fenômeno da cavitação (formação de bolhas que aparecem espontaneamente nos turbilhões que ocorrem quando um fluido é despressurizado, fenômeno este observado, por exemplo, atrás das hélices dos aviões causando seu desgaste e grandes ruídos).

Entre as várias propriedades pouco comuns apresentadas pelo hélio (não se ligar quimicamente a outro átomo, dificuldade em se ionizar, fraca polarização na presença de um campo elétrico), vamos examinar sua superfluidade no estado líquido (fig. 25-12). Liquefazendo-se à temperatura de 4,2 K à pressão normal, o hélio, quando submetido a temperaturas próximas de 2 K, torna-se superfluido, apresentando-se então como o mais frio, o mais puro (pode ser obtido com 3 átomos de impureza em 10^4 átomos de He_4 , o que significa um nível excepcional de pureza) e o mais ordenado entre todos os líquidos. A descoberta da superfluidade do hélio pelo físico russo Piotr Kapitza levou-o ao Prêmio Nobel de Física, em 1978. Antes dele, o físico Lev Landau, também russo, em 1962, recebeu o Nobel de Física pela explicação do fenômeno da superfluidade à luz das leis da Física Quântica.

Analisando as influências de variações da temperatura e da pressão e de impurezas no comportamento do hélio líquido, foi possível estudar fenômenos muito complexos que ocorrem, também, com outros materiais, principalmente nas vizinhanças das transições de fases. Vários desses fenômenos que aparentemente não teriam entre si qualquer relação puderam ser descritos pelo mesmo sistema de equações, comprovando a universalidade do comportamento da matéria, que em princípio suas bases podem ser descritas pelas mesmas leis.

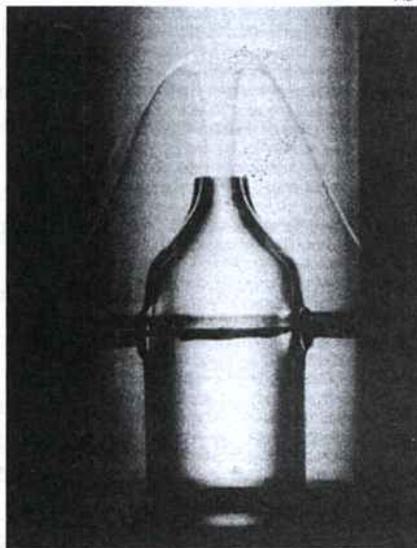


Fig. 25-12: O efeito de fonte, apresentado pelo hélio líquido superfluido: o líquido se escoia sem apresentar qualquer viscosidade aparente, sobe em forma de um filme pelas paredes do recipiente que o contém e esguicha espetacularmente.

COMPORTAMENTO CAÓTICO DA NATUREZA

A complexidade de um sistema está, quase sempre, associada com o número elevado de graus de liberdade que possa possuir. Não é difícil prever que um sistema constituído de 10^{23} átomos (que é o número de átomos contidos em um mol de uma substância qualquer, como vimos no capítulo 11) tenha um comportamento complicado, mas já mencionamos neste texto que, em certas circunstâncias, ele pode se auto-organizar, tendendo para uma situação em que grande número de átomos move-se conjuntamente, em cooperação mútua. O que intuitivamente não é esperado, porém, é que mesmo sistemas muito simples, às vezes com apenas um ou dois graus de liberdade, possam se comportar de maneira muito complexa. Consideremos o exemplo de um pêndulo que possa oscilar tanto na direção norte-sul, quanto na leste-oeste, isto é, um pêndulo cônico. Se o pêndulo for impulsionado com uma força periódica (para vencer o atrito) com frequência igual à sua frequência natural, ele se adaptará num tipo de oscilação que pode ser sempre prevista e que se repetirá indefinidamente, isto é, seu movimento é determinístico, podendo ser previsto pelas leis da Física. Entretanto, se a frequência propulsora for ligeiramente aumentada, um fato extraordinário ocorrerá: o pêndulo não oscilará mais em sua frequência natural e passará a girar desorganizadamente, de maneira não previsível, não sendo possível saber como ele estará se deslocando em um instante posterior. Diz-se então que ele deixou de ser determinístico e atingiu um comportamento caótico. O pêndulo pode, assim, apresentar comportamento determinístico ou caótico, dependendo da propulsão que lhe for comunicada, e pequenas alterações nessas condições podem conduzir a uma total perda do poder de previsão das leis da Mecânica aplicáveis a ele. O comportamento caótico tem sido encontrado com frequência em ampla gama de sistemas. Alguns exemplos mais conhecidos incluem: fluidos em escoamento turbulento, condições atmosféricas, fibrilação cardíaca, gotejamento de uma torneira, população de insetos, reações químicas etc. Há alguns aspectos universais que estão presentes sempre que certas situações caóticas são atingidas (fig. 25-13). Embora o caos represente a quebra da ciência preditiva, uma certa ordem matemática pode ser encontrada subjacente a ele. Na verdade, caos e auto-organização acabam sendo relacionados, pois tem-se percebido que se um sistema passa por uma transição de auto-organização tende a passar, também, por transições que o conduzem a um comportamento caótico.



Fig. 25-13: Uma bela figura de caos, obtida por simulação em computador. Observe que a mesma forma é repetida em várias escalas.

O comportamento caótico da natureza, apesar de muito comum, era visto até alguns anos atrás como verdadeiro enigma, ou mesmo como aberração. Na década de 70 alguns cientistas (matemáticos, físicos, biólogos e químicos) começaram a encontrar caminho no meio daquelas desordens. Um dos pioneiros das pesquisas sobre o caos foi o físico americano Mitchell Feigenbaum, do laboratório de Los Álamos.

O hélio líquido também é usado como modelo para estudos dos sistemas de caos. Experiências realizadas pelo físico francês Albert Libchaber,

aquecendo lentamente hélio em uma pequena caixa, a partir de temperaturas próximas a 2 K, permitiram fazer um estudo detalhado das transições de fase por que ele passava, submetido a variações de temperatura muito pequenas entre as camadas (inferiores a 0,001 °C), evoluindo de um estado em que se apresenta em convecção estável, até atingir grandes turbulências (um estado caótico, tal como Feigenbaun havia previsto).

O estudo dos sistemas complexos, sem dúvida, se encontra em fase incipiente e há um amplo horizonte de fenômenos a eles relacionados ainda por pesquisar.

AO FINALIZAR ESTA PEQUENA SÍNTESE sobre prováveis áreas de pesquisas que serão desenvolvidas no campo da Física, no século XXI, não podemos deixar de mencionar um aspecto que já temos ressaltado em diversas oportunidades em nosso curso: a necessidade de luta da comunidade como um todo, cientistas, autoridades e cidadãos comuns, para que as pesquisas científicas se desenvolvam visando sobretudo à melhoria das condições de vida de toda a humanidade e para que suas conquistas sejam distribuídas democraticamente entre as diversas nações, sem discriminação de poder político ou econômico, raça, cor, sexo ou religião. Esperando que este estágio seja alcançado brevemente e que os desmandos que vêm sendo observados possam desaparecer, terminamos transcrevendo as confiantes palavras do grande matemático e filósofo Bertrand Russel: “O poder da humanidade que criou este imenso campo do saber há de ter forças para levá-lo ao bom caminho”.

Bertrand Russel (1872-1970)

Famoso matemático e filósofo inglês, que pode ser considerado como um cidadão do mundo. Foram raros os aspectos sociais, políticos e morais de nossa sociedade que escaparam ao estudo objetivo, claro e profundo de Bertrand Russel. Em suas numerosas obras aborda uma gama enorme de questões controvertidas, indicando-nos rumos e soluções. Foi grande lutador pela paz mundial e pelo desarmamento nuclear, tendo sido até mesmo preso por sua participação nestes movimentos.

ular questões de vestibular questões de vestibul

As questões seguintes foram selecionadas em provas de concursos vestibulares das principais universidades e faculdades de vários estados brasileiros. Seu objetivo é transmitir ao estudante uma idéia de como são formuladas as provas de Física dos exames vestibulares em nosso país.

CAPÍTULO 17 — Carga elétrica

1. Marque a afirmativa verdadeira:

- a) Se um corpo A, eletrizado positivamente, atrai um outro corpo B, concluímos que este está carregado negativamente.
- b) Dizemos que um corpo qualquer está eletrizado negativamente quando ele possui um certo número de elétrons livres.
- c) A eletrização por atrito de dois corpos consiste na passagem de elétrons de um corpo para outro, ficando eletrizado positivamente o corpo que perdeu elétrons.
- d) Em virtude de não existirem elétrons livres em um isolante, ele não pode ser eletrizado negativamente.
- e) Quando dois corpos são atritados um contra o outro, ambos adquirem cargas elétricas de mesmo sinal.

2. Marque a afirmativa correta:

- a) Um bastão de vidro positivamente carregado atrai um objeto suspenso. Podemos concluir que o objeto está negativamente carregado.
- b) Considerando um sistema eletricamente isolado, constituído por dois corpos A e B, carregados com cargas de sinais contrários, não podemos concluir, com certeza, que a força elétrica sobre o corpo A seja igual, em intensidade, à força elétrica sobre o corpo B.
- c) Se carregarmos um corpo eletricamente, utilizando-nos do fenômeno da indução eletrostática, podemos dizer que a soma algébrica das cargas positivas e negativas sobre este corpo é nula.
- d) Quando um corpo A é colocado próximo de um corpo B, sem se tocarem, e ocorre a indução eletrostática, podemos afirmar que a soma algébrica das cargas positivas e negativas sobre qualquer um deles é igual a zero.
- e) A força elétrica que uma carga puntual exerce sobre outra, também puntual, não varia se outras cargas puntuais forem trazidas para perto delas.

3. Se um corpo carregado positivamente é deixado cair em direção à Terra, ele cai mais depressa do

que se estivesse descarregado. De tal fato concluímos que:

- a) A Terra possui carga negativa em excesso.
- b) A Terra possui carga positiva em excesso.
- c) A atração gravitacional modifica-se quando os corpos estão carregados eletricamente.
- d) Há indução de cargas negativas na superfície da Terra e, portanto, há uma força suplementar de atração.
- e) Nenhuma alternativa acima é correta.

4. Três bolas metálicas podem ser carregadas eletricamente. Observa-se que cada uma das três bolas atrai cada uma das outras duas. Três hipóteses são apresentadas:

- I. Apenas uma das bolas está carregada.
- II. Duas bolas estão carregadas.
- III. As três bolas estão carregadas.

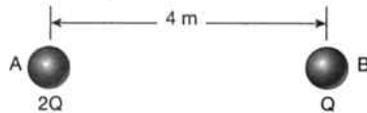
O fenômeno pode ser explicado

- a) Somente pela hipótese II.
- b) Somente pelas hipóteses II e III.
- c) Somente pela hipótese I.
- d) Somente pela hipótese III.
- e) Por todas as três hipóteses.

5. Das afirmações seguintes, a errada é:

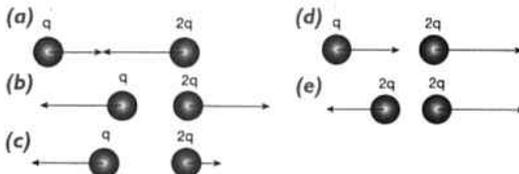
- a) Duas cargas q_1 e q_2 são iguais quando, colocadas sucessivamente a uma mesma distância de uma carga Q , forem solicitadas por forças de mesmo módulo.
- b) Se duas cargas elétricas diferentes q_1 e q_2 forem solicitadas com forças iguais por uma terceira carga Q , a razão entre estas cargas será igual ao inverso da razão entre os quadrados das distâncias respectivas de q_1 e q_2 a Q .
- c) A força de interação entre duas cargas elétricas puntuais é proporcional ao produto delas.
- d) A razão entre duas cargas elétricas é igual à razão entre as forças com que elas são solicitadas por uma terceira carga, colocada a uma mesma distância delas.
- e) A constante da lei de Coulomb é numericamente igual à força com que duas cargas unitárias, colocadas a uma distância unitária uma da outra, se solicitam.

6. As forças gravitacionais e as forças eletrostáticas são semelhantes em alguns aspectos e diferentes em outros. Assinale a afirmativa abaixo que *não é verdadeira* para ambos os tipos de forças:
- Quando há interação entre dois corpos, as forças obedecem à 3ª lei de Newton.
 - A força é proporcional ao inverso do quadrado da distância.
 - A força que atua numa certa quantidade de massa (ou carga elétrica) é proporcional a essa quantidade de massa (ou carga elétrica).
 - As forças podem ser de atração ou repulsão.
 - As forças podem ser detectadas experimentalmente em um laboratório.
7. Duas esferas, A e B, estão separadas uma da outra por uma distância de 4 m. Uma carga de $2Q$ C é distribuída sobre a esfera A e uma carga de Q C é distribuída sobre a esfera B. Considere apenas as interações devidas a forças elétricas. Qual deve ser a relação do módulo da força exercida por A sobre B, comparada com o módulo da força exercida por B sobre A?
- O módulo da força em A é quatro vezes o módulo da força em B.
 - O módulo da força em A é duas vezes o módulo da força em B.
 - O módulo da força em A é igual ao módulo da força em B.
 - O módulo da força em A é a metade do módulo da força em B.
 - O módulo da força em A é a quarta parte do módulo da força em B.



Questão 7.

8. Duas partículas livres de mesma massa têm cargas respectivas q e $2q$. Qual das seguintes figuras representa as acelerações das partículas, sabendo-se que a interação gravitacional é desprezível em comparação com a interação elétrica?

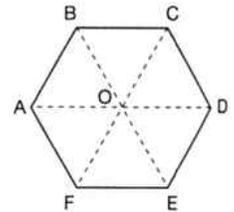


Questão 8.

9. Duas cargas pontuais estão separadas de $2,0 \times 10^{-2}$ m e se atraem com uma força de 27×10^{-4} N. Se a distância entre as cargas for aumentada para $6,0 \times 10^{-2}$ m, a força entre elas passará a ser:
- 27×10^{-4} N
 - $9,0 \times 10^{-4}$ N
 - $3,0 \times 10^{-4}$ N
 - $6,0 \times 10^{-4}$ N
 - Nula

10. Duas cargas pontiformes $q_1 = 9,0 \times 10^{-6}$ C e $q_2 = 9,0 \times 10^{-6}$ C estão à distância de 1,0 m uma da outra, na água pura. Sabendo-se que a constante dielétrica da água é 81, a força entre as cargas será:
- $9,0 \times 10^{-3}$ N
 - $7,2 \times 10^{-1}$ N
 - Nula, pois a água pura não é condutora.
 - $9,0 \times 10^{-27}$ N
 - $7,2 \times 10^{-27}$ N

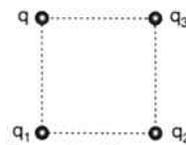
11. Duas partículas eletrizadas com cargas q , idênticas, são fixadas nos vértices A e D de um hexágono regular ABCDEF de centro O, conforme a figura desta questão. Uma posição de equilíbrio para uma terceira partícula com carga Q é o ponto:



Questão 11.

12. A figura apresenta cargas elétricas fixas nos vértices de um quadrado. As forças que a carga q exerce sobre as cargas q_1 , q_2 e q_3 são iguais em módulo. Podemos concluir que:

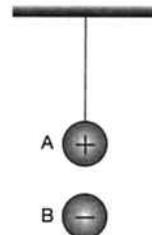
- $q_1 = q_2 = q_3$
- $q_3 = q_1 < q_2$
- $q_3 < q_2 < q_1$
- $q_1 = q_3 > q_2$
- $q_3 > q_2 > q_1$



Questão 12.

13. Um pequeno corpo A, eletrizado positivamente com uma carga Q_1 , está suspenso na extremidade de um fio isolante. O pequeno corpo B, de 4,5 g de massa, eletrizado negativamente com uma carga Q_2 , encontra-se em equilíbrio, tendo seu peso anulado pela força de atração de A (veja a figura). Se a massa do corpo B fosse de apenas 0,50 g, ele ainda ficaria em equilíbrio, se:

- Reduzíssemos à metade a carga Q_1 .
- Reduzíssemos a carga Q_2 para $1/3$ do seu valor inicial.
- Aumentássemos a distância entre A e B para 3 vezes seu valor inicial.
- Mergulhásemos A e B em um líquido cuja constante dielétrica fosse igual a 3.
- Mantivéssemos invariável a situação anterior.



Questão 13.

CAPÍTULO 18 — Campo elétrico

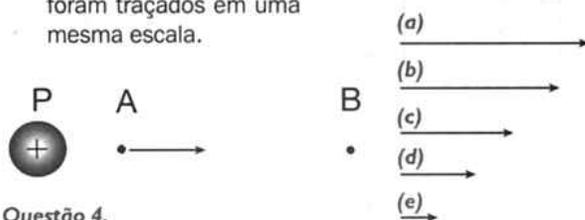
- Um próton, um elétron e um nêutron são lançados em direção a uma placa extensa, eletrizada uniformemente, com uma velocidade \vec{v} perpendicular a ela. Considerando apenas as interações elétricas, podemos afirmar que:
 - As três partículas atingem a placa.
 - O elétron descreve uma trajetória parabólica.
 - O nêutron é freado pela ação do campo elétrico.
 - O próton e o elétron apresentam acelerações iguais em módulo.
 - O elétron apresenta aceleração de módulo maior.
- Um elétron é colocado em repouso entre duas placas paralelas carregadas com cargas iguais e de sinais contrários. Considere desprezível o peso do elétron. Aponte a afirmativa *correta*:
 - O elétron move-se na direção e sentido do campo elétrico.
 - O elétron move-se na direção do campo elétrico, mas em sentido oposto.
 - O elétron fica em repouso.
 - O elétron move-se descrevendo uma parábola.
 - O elétron ficará oscilando para baixo e para cima entre as placas.
- Sobre uma partícula carregada atuam exclusivamente as forças devidas aos campos elétrico e gravitacional terrestre. Admitindo que os campos sejam uniformes e que a partícula caia verticalmente, com velocidade constante, podemos afirmar que:
 - A intensidade do campo elétrico é igual à intensidade do campo gravitacional.
 - A força devida ao campo elétrico é menor, em módulo, do que o peso da partícula.
 - A força devida ao campo elétrico é maior, em módulo, do que o peso da partícula.
 - A força devida ao campo elétrico é igual, em módulo, ao peso da partícula.
 - A direção do campo elétrico é perpendicular à direção do campo gravitacional.
- Uma carga positiva, puntual, situada no ponto P , cria um campo elétrico no ponto A , como se vê representado pelo vetor aplicado em A . Qual dos vetores melhor representaria o campo elétrico criado pela referida carga, no ponto B ? Os vetores foram traçados em uma mesma escala.

P

A

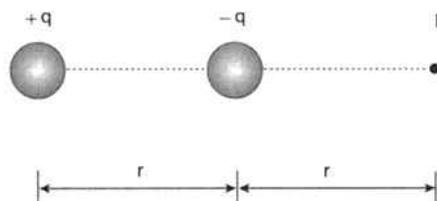
B

Questão 4.



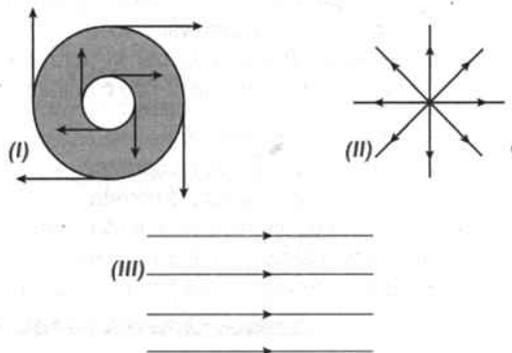
- Considerando o esquema encontrado na figura desta questão, o módulo do vetor campo elétrico no ponto P , devido às cargas elétricas $+q$ e $-q$, é dado por (k = constante da lei de Coulomb):

- zero
- $\frac{kq}{r^2}$
- $\frac{2kq}{r^2}$
- $\frac{4kq}{r^2}$
- $\frac{3kq}{4r^2}$



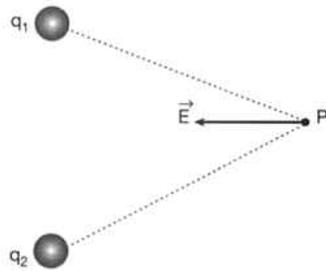
Questão 5.

- Analisar as afirmativas seguintes e assinalar aquelas que estão *corretas*. Um próton é lançado numa região onde existe um campo elétrico uniforme. Sua trajetória pode ser:
 - Uma reta.
 - Uma parábola.
 - Uma circunferência.
- Das seguintes figuras, a(s) que pode(m) representar as linhas de força de um campo elétrico produzido por cargas elétricas estacionárias é(são):
 - Todas.
 - Apenas II.
 - Apenas I e II.
 - Apenas I e III.
 - Apenas II e III.



Questão 7.

- Num ponto P , que dista igualmente de duas cargas q_1 e q_2 , há um campo elétrico \vec{E} cuja direção está mostrada na figura. Para que tal fato ocorra:
 - As duas cargas devem ser positivas.
 - As duas cargas devem ser negativas.
 - q_1 tem que ser positiva e q_2 negativa.
 - q_1 tem que ser negativa e q_2 positiva.
 - As cargas q_1 e q_2 não podem ter o mesmo módulo.

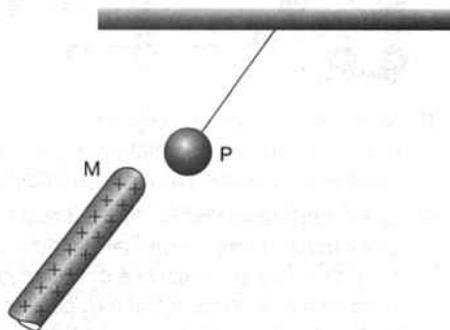


Questão 8.

9. O campo elétrico \vec{E} , entre duas placas carregadas com cargas iguais, mas de sinais contrários, é uniforme. A respeito da força elétrica que atua sobre uma carga $+q$, colocada entre as referidas placas, pode-se afirmar que:
- Aumenta à medida que a carga $+q$ se aproxima da placa negativa.
 - É inversamente proporcional à distância de $+q$ à placa negativa.
 - É inversamente proporcional à distância de $+q$ à placa positiva.
 - É nula, qualquer que seja a posição de $+q$ entre as placas.
 - Tem o mesmo valor, qualquer que seja a posição de $+q$ entre as placas.
10. Um bastão de vidro M , eletrizado positivamente, é colocado nas proximidades de uma pequena esfera metálica P , não-eletrizada, suspensa por um fio leve de material isolante. Observa-se que P é atraída por M . Considere as afirmativas seguintes:
- Em virtude da indução eletrostática, na região de P mais próxima de M aparecerá carga negativa.
 - A carga positiva e a carga negativa induzidas em P têm o mesmo valor absoluto.
 - A esfera P é atraída por M porque o campo criado pela carga de M não é uniforme.

Pode-se concluir que

- Apenas a afirmativa I é correta.
- Apenas a afirmativa II é correta.
- Apenas as afirmativas I e II são corretas.
- As afirmativas I, II e III são corretas.
- Apenas as afirmativas II e III são corretas.



Questão 10.

11. Na figura desta questão, Q é uma carga puntual positiva e \vec{v} representa a velocidade de um elétron ao passar pelo ponto P , situado a uma certa distância de Q . Seja \vec{E} o campo elétrico estabelecido por Q em P e \vec{F} a força que este campo exerce sobre o elétron ao passar por P . Que alternativa melhor representa os vetores \vec{E} e \vec{F} em P ?

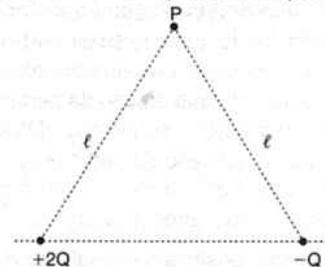


- (a) \vec{F} ← P → \vec{E} (d) \vec{F} ← \vec{E} → P
 (b) \vec{E} ← P → \vec{F} (e) \vec{E} ← P ↓ \vec{F}
 (c) P → \vec{E} → \vec{F}

Questão 11.

12. Um próton e um elétron são abandonados entre duas placas eletrizadas, onde existe um campo elétrico uniforme. Suponha que sobre essas partículas atuem apenas as forças \vec{F}_p (no próton) e \vec{F}_e (no elétron) exercidas pelo campo elétrico e sejam \vec{a}_p e \vec{a}_e as acelerações que elas adquirem. Considerando-se os módulos das forças e das acelerações mencionadas, pode-se afirmar que
- $F_p = F_e$ e $a_p = a_e$
 - $F_p = F_e$ e $a_p < a_e$
 - $F_p > F_e$ e $a_p > a_e$
 - $F_p > F_e$ e $a_p < a_e$
 - $F_p < F_e$ e $a_p = a_e$

13. No ponto P da figura desta questão, o vetor campo elétrico é melhor representado por:



- (a) ↓ (b) ↑ (c) ↗
 (d) ↙ (e) →

Questão 13.

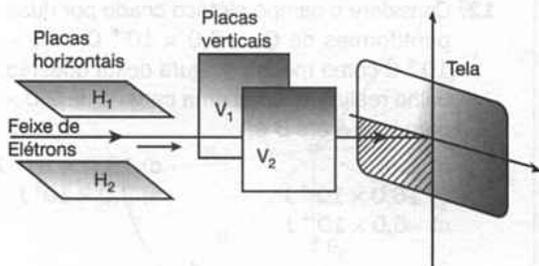
14. Sobre uma carga elétrica q , situada num ponto onde há um campo eletrostático \vec{E} , atua uma força eletrostática \vec{F} . Afirma-se que:

- I. O módulo de \vec{F} é proporcional ao módulo de q e ao módulo de \vec{E} .
- II. A direção de \vec{F} sempre coincide com a direção de \vec{E} .
- III. O sentido de \vec{F} sempre coincide com o sentido de \vec{E} .

Das afirmativas acima é(são) correta(s):

- a) Apenas I e II.
- b) Apenas I e III.
- c) Apenas II e III.
- d) Apenas I.
- e) Todas as três.

15. No interior do tubo de um certo aparelho de televisão, dois pares de placas metálicas, carregadas eletricamente com cargas de sinais opostos, desviam o feixe de elétrons que incidirá na tela. Na figura, é mostrada uma situação em que as placas estão descarregadas.



Questão 15.

Para que o feixe seja desviado para a região hachurada na tela, os sinais das cargas das placas horizontais, H_1 e H_2 , e das placas verticais, V_1 e V_2 , devem ser

- a) H_1+ ; H_2- ; V_1- ; V_2+
- b) H_1- ; H_2+ ; V_1- ; V_2+
- c) H_1+ ; H_2- ; V_1+ ; V_2-
- d) H_1- ; H_2+ ; V_1+ ; V_2-
- e) H_1+ ; H_2- ; V_1 nula e V_2 nula

CAPÍTULO 19 — Potencial elétrico

1. Um próton penetra com energia cinética de $2,4 \times 10^{-16}$ J numa região extensa de um campo elétrico uniforme, cuja intensidade é $3,0 \times 10^4$ N/C. A trajetória descrita é retilínea, com a partícula invertendo o sentido do movimento após percorrer uma distância d . Qual o valor de d ?

- a) 5 cm
- b) 10 cm
- c) 15 cm
- d) 20 cm
- e) 50 cm

2. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são corretas. Denomina-se 1 elétron-volt (1 eV) a energia que um elétron adquire quando é acelerado por uma voltagem de 1 V.

- I. Um próton, acelerado por uma voltagem de 10^6 V, adquire uma energia de 10^6 eV.
- II. Um nêutron, abandonado em um campo elétrico de 10^4 V/m, adquire uma energia de 10^4 eV.
- III. Uma partícula-alfa, acelerada por uma voltagem de 10^6 V, adquire uma energia de 10^6 eV.

3. Considere duas grandes placas planas, paralelas, carregadas com cargas iguais e contrárias. Quando dizemos que entre elas existe um campo elétrico uniforme, isto significa que:

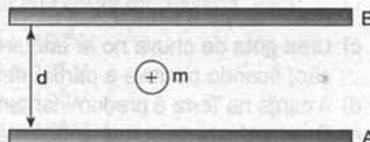
- a) Não aparece força elétrica sobre uma carga puntual colocada entre as placas.
- b) O potencial tem o mesmo valor em todos os pontos situados entre as placas.
- c) O valor do campo é inversamente proporcional ao quadrado da distância até a placa.
- d) O campo elétrico entre as placas é sempre nulo.
- e) O campo elétrico tem o mesmo valor em todos os pontos situados entre as placas.

4. Uma placa plana metálica muito grande, ligada à terra, está colocada paralelamente a outra placa idêntica, isolada e carregada com carga $+q$. A distância entre elas é pequena e vale $2d$. Dizer o que acontece com a diferença de potencial entre as placas se a distância entre elas é reduzida para d :

- a) Dobra de valor porque a indução é o dobro.
- b) Não varia, pois o potencial da placa ligada à terra é nulo.
- c) Depende do valor da carga induzida na placa ligada à terra.
- d) Fica dividida por dois.
- e) Como o campo elétrico é uniforme entre as placas, a diferença de potencial é sempre nula.

5. Para que seja equilibrado o peso de uma partícula de massa m , eletrizada positivamente com uma carga q , colocada entre as placas horizontais A e B (veja a figura), separadas por uma distância d , devemos aplicar uma voltagem V_{AB} entre as placas tal que:

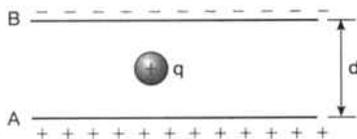
- a) $V_{AB} = mg/qd$, sendo $V_A > V_B$
- b) $V_{AB} = mgd/q$, sendo $V_A > V_B$
- c) $V_{AB} = mdq/g$, sendo $V_A > V_B$
- d) $V_{AB} = mq/g$, sendo $V_A < V_B$
- e) $V_{AB} = mg$, sendo $V_A < V_B$



Questão 5.

6. Na figura, a partícula de massa $m = 1 \text{ g}$ e carga $q = 1 \mu\text{C}$ encontra-se em equilíbrio entre as duas grandes placas A e B eletrizadas. Se $d = 1 \text{ cm}$, concluímos que a voltagem V_{AB} vale (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$):

- a) 1 V
b) 6 V
c) 12 V
d) 100 V
e) 200 V



Questão 6.

7. A energia elétrica gasta para se movimentar uma carga elétrica $q = 2,0 \times 10^{-8} \text{ C}$ ao longo de uma linha de força de um campo elétrico uniforme $E = 2,0 \times 10^4 \text{ N/C}$, numa distância de 1,0 m, é:

- a) $5,0 \times 10^{-3} \text{ J}$
b) $4,0 \times 10^{-4} \text{ J}$
c) $8,0 \times 10^{-4} \text{ J}$

- d) Nula, porque, sendo o campo uniforme, não há diferença de potencial elétrico entre dois de seus pontos.

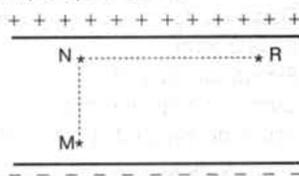
- e) $3,0 \times 10^4 \text{ J}$

8. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são corretas. O campo elétrico uniforme \vec{E} , entre as placas carregadas mostradas na figura, tem um módulo $E = 4,0 \times 10^4 \text{ N/C}$. As distâncias valem $MN = 0,40 \text{ m}$ e $NR = 0,30 \text{ m}$.

- I. A diferença de potencial entre os pontos N e M é $V_N - V_M = 1,0 \times 10^5 \text{ J/C}$.

- II. O trabalho realizado pelo campo, quando uma carga positiva de $2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ é transportada de N a M, é $-3,2 \times 10^{-2} \text{ J}$.

- III. O trabalho realizado pelo campo, quando uma carga positiva de $2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ é transportada de R a M, é $3,2 \times 10^{-2} \text{ J}$.



Questão 8.

9. Verifica-se experimentalmente que, em condições normais, existe um campo elétrico na atmosfera terrestre, de 100 N/C , dirigido verticalmente para baixo, criado por cargas elétricas na Terra. Podemos então concluir, exceto, que:

- a) Entre um ponto a 2,0 m de altura e a superfície da Terra existe uma voltagem de 200 V.

- b) Os íons positivos existentes no ar tendem a mover-se para baixo e os íons negativos tendem a mover-se para cima.

- c) Uma gota de chuva no ar adquire uma polarização, ficando positiva a parte inferior da gota.

- d) A carga na Terra é predominantemente negativa.

- e) O valor deste campo é suficiente para vencer a rigidez dielétrica do ar, ocasionando os relâmpagos.

10. Duas cargas pontuais, $+Q$ e $-Q$, estão separadas de uma certa distância r . Sejam E e V os valores do campo elétrico e do potencial elétrico no ponto médio entre as cargas. Podemos afirmar que:

- a) $E = 0$ e $V = 0$

- d) $E \neq 0$ e $V \neq 0$

- b) $E \neq 0$ e $V = 0$

- e) $E = k_0 Q/r^2$ e $V = k_0 Q/r$

- c) $E = 0$ e $V \neq 0$

11. A figura mostra duas cargas elétricas $+q$ e $+2q$, colocadas sobre a reta AB. Podemos afirmar que em um ponto situado sobre a reta:

- a) À esquerda de A, o potencial elétrico se anula.

- b) Entre A e B, o campo se anula.

- c) Entre A e B, o potencial se anula.

- d) À direita de B, o potencial se anula.

- e) À direita de B, o campo se anula.



Questão 11.

12. Considere o campo elétrico criado por duas cargas puntiformes de $Q_1 = 8,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ e $Q_2 = -8,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ como mostra a figura desta questão. O trabalho realizado sobre uma carga q de $2,0 \times 10^{-9} \text{ C}$ para ir de A até B é:

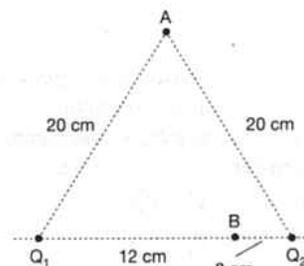
- a) zero

- d) $18,0 \times 10^{-6} \text{ J}$

- b) $+6,0 \times 10^{-4} \text{ J}$

- e) $3,0 \times 10^5 \text{ J}$

- c) $-6,0 \times 10^{-4} \text{ J}$



Questão 12.

13. Duas cargas pontuais Q_1 e Q_2 , ambas positivas, estão separadas por uma distância d . Sabe-se que $Q_1 = 4Q_2$. Em relação a esta situação, a afirmativa falsa é:

- a) As cargas Q_1 e Q_2 se repelem.

- b) As cargas Q_1 e Q_2 interagem com forças iguais em módulo e de sentidos contrários.

- c) A carga Q_1 cria, na posição ocupada por Q_2 , um campo elétrico cujo módulo é quatro vezes maior que o do campo elétrico criado por Q_2 na posição ocupada por Q_1 .

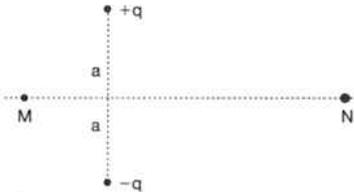
- d) Num ponto equidistante de Q_1 e Q_2 o potencial elétrico criado por Q_1 é quatro vezes maior que o criado por Q_2 .

- e) O módulo da força de Q_1 sobre Q_2 é quatro vezes maior que o módulo da força de Q_2 sobre Q_1 .

14. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são *corretas*:

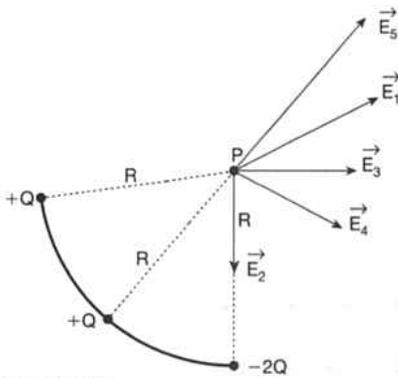
A partir da figura desta questão, que mostra duas cargas puntuais $+q$ e $-q$, podemos afirmar:

- I. Os pontos M e N estão no mesmo potencial.
- II. Nenhum trabalho externo é necessário para transportar uma carga positiva de M até N com velocidade constante.
- III. Nenhuma força externa precisa ser aplicada para transportar uma carga positiva de M até N , com velocidade constante.



Questão 14.

As questões 15 e 16 referem-se ao diagrama destas questões.



Questões 15 e 16.

15. O campo elétrico em P , criado pelas três cargas dispostas no arco de círculo, é melhor representado pelo vetor:

- a) \vec{E}_1
- b) \vec{E}_2
- c) \vec{E}_3
- d) \vec{E}_4
- e) zero

16. O potencial no ponto P é (K = constante da lei de Coulomb):

- a) $4KQ/R$
- b) zero
- c) $2KQ/R^2$
- d) KQ/R
- e) $4KQ/R^2$

17. Uma esfera condutora eletrizada, de raio $R = 2,0$ m, no vácuo, é suposta isolada de outros corpos. Em um ponto P , da sua superfície, o potencial elétrico tem o valor $V = 8,0 \times 10^{-2}$ V. O potencial e o campo elétrico no centro da esfera valem, respectivamente:

- a) $V = 0$ e $E = 0$
- b) $V = 8,0 \times 10^{-2}$ V e $E = 0$
- c) $V = 4,0 \times 10^{-2}$ V e $E = \infty$
- d) $V = \infty$ e $E = \infty$
- e) $V = 8,0 \times 10^{-2}$ V e $E = 4,0 \times 10^{-2}$ V/m

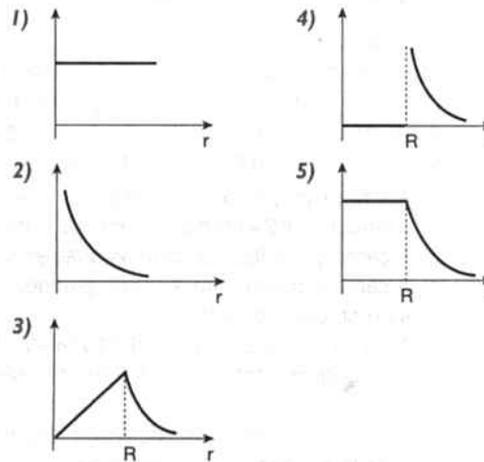
18. Considere uma esfera condutora, de raio R , carregada com uma carga Q , em equilíbrio eletrostático. Podemos afirmar que:

- a) O campo elétrico na superfície da esfera é nulo.
- b) A uma distância d da superfície, o campo vale $E = k_0 Q/d^2$.
- c) O campo no centro da esfera é igual ao campo em sua superfície.
- d) Duplicando Q , duplicamos o valor do campo no centro da esfera.
- e) Todas as afirmativas estão erradas.

19. Considere a mesma esfera da questão anterior. Podemos afirmar que:

- a) O potencial em sua superfície é nulo.
- b) A uma distância d da superfície, o potencial vale $V = k_0 Q/d$.
- c) O potencial no centro da esfera é igual ao potencial da superfície.
- d) O potencial no centro da esfera é nulo.
- e) Todas as afirmativas são falsas.

20. No conjunto de gráficos desta questão, dois representam a variação do potencial e da intensidade do campo elétrico, respectivamente, em função da distância r ao centro de uma esfera condutora eletrostaticamente carregada de raio R . Quais são eles?



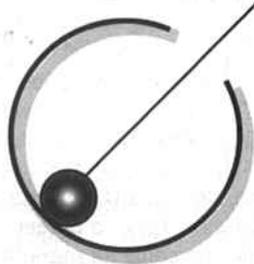
Questão 20.

- a) 3 e 1
- b) 4 e 1
- c) 2 e 1
- d) 5 e 3
- e) 5 e 4

21. A rigidez dielétrica do ar é aproximadamente $3,0 \times 10^6$ N/C. Uma esfera condutora carregada e isolada, de raio 1,0 cm, está em contato com o ar atmosférico. Logo, o potencial em sua superfície, quando sua carga for máxima, será:

- a) $6,0 \times 10^{-6}$ V
- b) $3,0 \times 10^6$ V
- c) $6,0 \times 10^6$ V
- d) $3,0 \times 10^4$ V
- e) $3,3 \times 10^{-4}$ V

22. Considere um condutor (de forma qualquer) eletrizado, em equilíbrio eletrostático. Das afirmativas seguintes, assinale aquela que *não* é verdadeira:
- Apesar de o condutor estar eletrizado, o campo elétrico é nulo em seu interior.
 - Se o condutor estiver eletrizado positivamente, a carga estará distribuída em sua superfície.
 - Todos os pontos do condutor estão no mesmo potencial.
 - Em qualquer ponto exterior ao condutor e próximo à sua superfície, o campo elétrico tem o mesmo valor.
 - Se o condutor estiver eletrizado negativamente, a carga estará distribuída em sua superfície.
23. Dispomos de dois corpos condutores, carregados, em equilíbrio eletrostático. Se ligarmos estes corpos através de um fio também condutor, uma corrente elétrica fluirá de um corpo para o outro, até que:
- Ambos fiquem com a mesma quantidade de carga.
 - Ambos fiquem com quantidades de carga proporcionais às suas massas.
 - Ambos fiquem com quantidades de carga proporcionais aos seus volumes.
 - Ambos fiquem com a mesma densidade superficial de carga.
 - Ambos fiquem com o mesmo potencial elétrico.
24. Uma pequena esfera metálica de raio r está eletrizada com carga $q > 0$. Uma outra esfera, também metálica, bem maior, de raio R , está descarregada. Introduzindo a esfera pequena na grande e encostando uma à outra, podemos afirmar:
- A esfera pequena descarrega-se e a carga q distribui-se na superfície da esfera grande.
 - A carga q distribui-se entre as duas esferas.
 - A carga q passa para a esfera grande, distribuindo-se em seu interior.
 - A carga q passa para a esfera grande, ficando concentrada nas proximidades da esfera pequena.
 - A carga q continua na esfera pequena e a esfera grande continua descarregada.

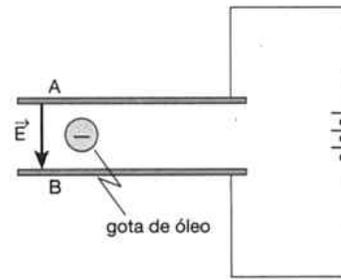


Questão 24.

- Leia o texto abaixo para responder às questões 25 e 26.
- Em suas famosas experiências, no início do século XX, R. Millikan conseguiu determinar o valor da carga

do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C) equilibrando o peso de gotículas de óleo eletrizadas, colocadas em um campo elétrico vertical e uniforme, produzido por duas placas planas ligadas a uma fonte de voltagem (veja a figura).

25. Se cada gotícula tinha a massa de $2,0 \times 10^{-15}$ kg, o valor do campo aplicado para equilibrar o peso de uma gotícula, com apenas um elétron em excesso, deveria ser:
- $2,0 \times 10^{15}$ N/C
 - $1,9 \times 10^{10}$ N/C
 - $1,2 \times 10^5$ N/C
 - $1,6 \times 10^{-19}$ N/C
 - $1,9 \times 10^{-14}$ N/C
26. Se as placas A e B estavam distanciadas de 1,5 mm, a voltagem V_{AB} , fornecida pela fonte de tensão, deveria ser de:
- $1,9 \times 10^5$ V
 - $2,0 \times 10^3$ V
 - $1,8 \times 10^2$ V
 - 120 V
 - 12 V

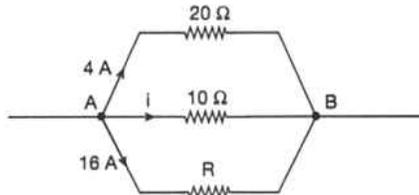


Questões 25 e 26.

CAPÍTULO 20 — Corrente elétrica

- Uma corrente elétrica de 3 A é o mesmo que:
 - 3 joules por segundo
 - 3 volts por metro
 - 3 ohms por metro
 - 3 coulombs por segundo
 - 3 elétrons por segundo
- No modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, supõe-se que o elétron descreva uma circunferência de raio $R = 0,53 \times 10^{-10}$ m, realizando $6,6 \times 10^{15}$ revoluções por segundo em torno do núcleo. Sendo de $1,6 \times 10^{-19}$ C o módulo da carga do elétron, resulta que seu movimento equivale a uma corrente elétrica de intensidade (em ampère):
 - $1,05 \times 10^{-4}$
 - $1,06 \times 10^{-3}$
 - 0,106
 - $1,06 \times 10^{-5}$
 - $1,06 \times 10^{-2}$
- Através de uma seção reta de um fio condutor passam 0,4 C de carga em 0,1 s. Se a resistência do condutor vale 20Ω , qual a diferença de potencial a que ele está submetido?
 - $8,0 \times 10^2$ V
 - 4,0 V
 - 60 V
 - 80 V
 - $5,0 \times 10^{-2}$ V

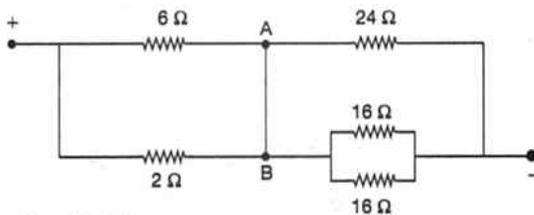
12. Na associação de resistores da figura desta questão, os valores de I e de R são, respectivamente:



Questão 12.

- a) 8 A e 5 Ω
- b) 5 A e 8 Ω
- c) 1,6 A e 5 Ω
- d) 2,5 A e 2 Ω
- e) 80 A e 160 Ω

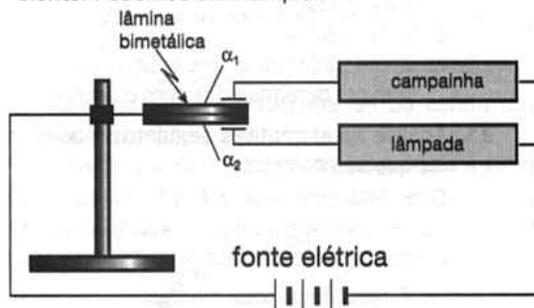
13. Determine a resistência equivalente do circuito desta questão.



Questão 13.

- a) 16 Ω
- b) 7,5 Ω
- c) 4,5 Ω
- d) 8,2 Ω
- e) 10 Ω

14. Uma lâmina bimetálica, de coeficientes de dilatação α_1 e α_2 , é presa num suporte e ligada a um circuito, como mostra a figura desta questão. A situação mostrada corresponde à temperatura ambiente. Podemos afirmar que:



Questão 14.

- a) A lâmpada acenderá se resfriarmos a lâmina e se α_2 for menor que α_1 .
- b) A lâmpada acenderá se resfriarmos a lâmina e se α_2 for maior que α_1 .
- c) A campainha tocará se resfriarmos a lâmina e se α_2 for maior que α_1 .
- d) A lâmpada acenderá se aquecermos a lâmina e se α_2 for maior que α_1 .
- e) A campainha tocará se aquecermos a lâmina e se α_1 for maior que α_2 .

15. A diferença de potencial elétrico nas tomadas de nossas casas é de 110 V. Um barbeador elétrico ligado a uma tomada é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 10 A. A potência elétrica consumida pelo barbeador é de:

- a) 11 W
- b) 110 W
- c) 1 100 W
- d) 11 kW
- e) 121 kW

16.

Resistor	Corrente	Resistência
R_1	i	R
R_2	$2i$	$\frac{R}{2}$
R_3	$\frac{i}{2}$	$2R$

As potências P_1 , P_2 e P_3 dissipadas, respectivamente, nos resistores R_1 , R_2 e R_3 desta tabela, satisfazem a relação:

- a) $P_1 = P_2 = P_3$
- b) $P_1 < P_2 < P_3$
- c) $P_1 < P_3 < P_2$
- d) $P_2 < P_3 < P_1$
- e) $P_3 < P_1 < P_2$

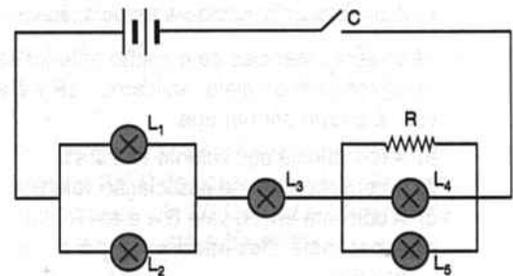
17. Em uma hora, a quantidade de energia fornecida ao ambiente por uma lâmpada de 60 W é de:

- a) 216 J
- b) 438 kJ
- c) 216 kJ
- d) 360 J
- e) 3,60 kJ

18. Uma torradeira de pão e uma lâmpada são ligadas em paralelo. Verificamos que a primeira dissipa maior energia do que a segunda. Podemos dizer então:

- a) A resistência da lâmpada é maior do que a da torradeira.
- b) A intensidade de corrente na lâmpada é maior do que a que circula na torradeira.
- c) A intensidade de corrente na lâmpada é de início menor do que na torradeira, porque o filamento está frio, mas logo depois se torna maior.
- d) A resistência elétrica é maior na torradeira porque a dissipação nesta é maior.
- e) Nada do que se afirmou é correto.

19. No esquema desta questão, as lâmpadas são idênticas. Que lâmpada brilhará mais quando a chave C for fechada?



Questão 19.

- a) L_1
- b) L_2
- c) L_3
- d) L_4
- e) L_5

20. Suponha que você tenha 4 pedaços de fio condutor, completamente idênticos, e deseja usá-los para aquecer água, ligando-os a uma bateria de resistência interna desprezível. Como você obterá maior aquecimento?

- a) Ligando três fios em série e um em paralelo com os três.
- b) Ligando os quatro fios em série.
- c) Ligando apenas um fio.
- d) Ligando os quatro fios em paralelo.
- e) O aquecimento será o mesmo, de qualquer forma que ligarmos os fios.

21. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas:

Em uma residência, a lâmpada da sala é de 100 W e a lâmpada da cozinha é de 60 W, ambas para 120 V. Considere as afirmativas seguintes:

- I. A voltagem na lâmpada da sala é maior do que a na lâmpada da cozinha.
- II. A corrente na lâmpada da sala é igual à corrente na lâmpada da cozinha.
- III. A resistência da lâmpada da sala é menor do que a da lâmpada da cozinha.

22. Uma lâmpada de 60 W, para 120 V, é ligada em uma tomada de 240 V. Supondo que não haja variação na resistência da lâmpada (e que ela não se queime), a corrente através dela e a potência por ela dissipada serão, respectivamente:

- a) 0,50 A e 60 W
- b) 1,0 A e 60 W
- c) 1,0 A e 120 W
- d) 1,0 A e 240 W
- e) 2,0 A e 240 W

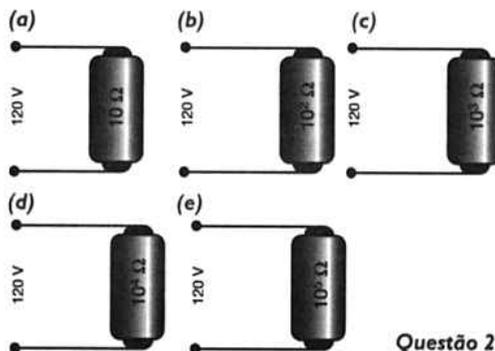
23. Uma lâmpada incandescente é ligada a uma tomada elétrica. O filamento da lâmpada fica incandescente e os fios de ligação permanecem frios, porque:

- a) Os fios de ligação têm maior resistência elétrica que o filamento.
- b) Os fios de ligação têm menor resistência elétrica que o filamento.
- c) Os fios de ligação têm capa isolante.
- d) O filamento é enrolado em forma de espiral.
- e) A corrente no filamento é maior do que nos fios de ligação.

24. Um chuveiro elétrico, cuja resistência é de 20Ω , foi fabricado para ser usado em voltagem de 110 V. Para obter um chuveiro com a mesma potência, numa rede de 220 V, devemos usar uma resistência de:

- a) 5Ω
- b) 10Ω
- c) 40Ω
- d) 80Ω
- e) 160Ω

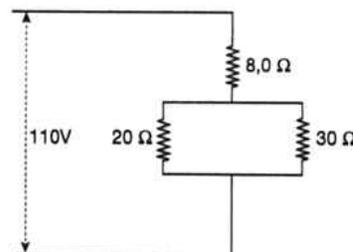
25. Se você quisesse aquecer um litro de água de 25°C até 100°C em cinco minutos aproximadamente, qual dos aquecedores esquematizados na figura desta questão você escolheria?



Questão 25.

26. A associação de resistores encontrada na figura desta questão é ligada a uma tensão de 100 V. A potência dissipada pelo resistor de 30Ω vale:

- a) 500 W
- b) 270 W
- c) 120 W
- d) 90 W
- e) 60 W



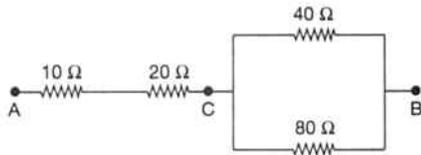
Questão 26.

27. Dois fios *M* e *N* de mesmo material e mesmo comprimento, tendo *M* o dobro do diâmetro de *N*, são ligados em série, em um circuito elétrico fechado, alimentados por um gerador. Podemos afirmar:

- a) A resistência do fio *M* é a metade da resistência do fio *N*.
- b) A potência elétrica desenvolvida em *M* é igual à potência desenvolvida em *N*.
- c) A intensidade da corrente que passa por *M* é duas vezes maior do que a que passa por *N*.
- d) O calor desenvolvido, pelo efeito Joule, durante um certo intervalo de tempo, em *M*, é quatro vezes maior do que o desenvolvido em *N*.
- e) A queda de potencial em *M* é quatro vezes menor do que a queda de potencial em *N*.

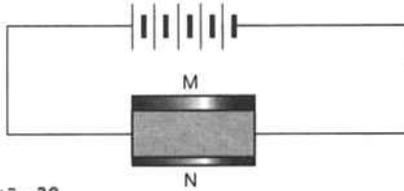
28. Os pontos *A* e *B* do circuito mostrado na figura são ligados aos pólos de uma bateria. Indique a afirmativa errada:

- a) A potência dissipada na resistência de 40Ω é maior que na de 80Ω .
- b) A potência dissipada entre *A* e *C* é menor que entre *C* e *B*.
- c) A diferença de potencial na resistência de 10Ω é menor que na de 20Ω .
- d) A corrente na resistência de 40Ω é maior que na de 80Ω .
- e) A potência dissipada na resistência de 10Ω é menor que na de 20Ω .



Questão 28.

29. Dois fios condutores M e N , de mesmo material e mesmo comprimento, são ligados em paralelo. O diâmetro de M é o dobro do diâmetro de N . A afirmação correta é:



Questão 29.

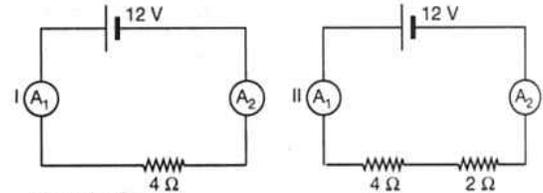
- A resistência de M é a metade da resistência de N .
 - A intensidade da corrente que passa em M é quatro vezes maior do que a da corrente que passa em N .
 - A potência elétrica desenvolvida em M é igual à potência desenvolvida em N .
 - A queda de potencial em M é quatro vezes maior do que a queda de potencial em N .
 - O calor desenvolvido por efeito Joule, durante um certo intervalo de tempo, é o mesmo em M e N .
30. A corrente elétrica que faz acender a lâmpada de sua casa é *alternada*, isto é, ela varia periodicamente com o tempo. Podemos mostrar que a energia calorífica gerada por esta corrente, em uma resistência R , durante o intervalo de tempo de um período, é dada por $Q = (1/2) R I^2 T$, onde I é o valor máximo da corrente alternada e T é o seu período. O valor eficaz de uma corrente alternada é definido como sendo o valor de uma corrente contínua que dissipasse a mesma quantidade de calor, no mesmo tempo, na resistência R . Então, o valor eficaz da corrente alternada é dado por:
- $2I$
 - I
 - $I/2$
 - $I/\sqrt{2}$
 - $I/\sqrt{3}$

CAPÍTULO 21 — Força eletromotriz — Equação do circuito

- Quando uma lanterna de pilha permanece ligada durante muito tempo, sua intensidade luminosa começa a decrescer. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*:
 - Depois de um certo tempo de uso a f.e.m. de uma pilha diminui.
 - Com o uso, o filamento de uma lâmpada envelhece e sua resistência elétrica diminui.
 - A resistência interna de uma pilha cresce quando ela é usada.

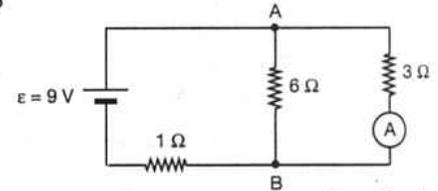
- Uma bateria possui uma força eletromotriz de 20,0 V e uma resistência interna de 0,50 Ω. Se intercalarmos uma resistência de 3,5 Ω entre os terminais da bateria, a diferença de potencial entre eles será:
 - 2,50 V
 - 5,00 V
 - $1,75 \times 10$ V
 - $2,00 \times 10$ V
 - Um valor ligeiramente inferior a $2,00 \times 10$ V.

- Uma bateria de $\epsilon = 12$ V e resistência interna desprezível é ligada a uma resistência de 4 Ω (circuito I). Os amperímetros A_1 e A_2 têm resistência interna desprezível. Ligamos uma resistência de 2 Ω em série com a de 4 Ω (circuito II). As leituras de A_1 e A_2 no circuito II são, respectivamente:



Questão 3.

- $A_1 = 3$ A e $A_2 = 3$ A
 - $A_1 = 3$ A e $A_2 = 2$ A
 - $A_1 = 2$ A e $A_2 = 2$ A
 - $A_1 = 2$ A e $A_2 = 3$ A
 - Diferentes das opções anteriores.
4. No circuito da figura, que corrente marca o amperímetro?
- 2 A
 - 10 A
 - 0
 - 3 A
 - 1 A



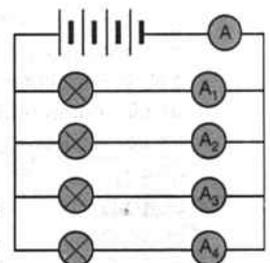
Questão 4.

- A figura mostra quatro lâmpadas (\otimes), todas com a mesma indicação de 3,0 W, ligadas em paralelo a uma bateria de resistência interna desprezível. As lâmpadas apresentam seu brilho normal e os amperímetros A_1 , A_2 , A_3 e A_4 marcam, cada um, 0,50 A. Assinale a afirmação *errada*:

- Em cada segundo, passam pelas quatro lâmpadas, em conjunto, 2,0 C.

- O amperímetro A estará indicando 2,0 A.
- A voltagem da bateria é de 24 V.

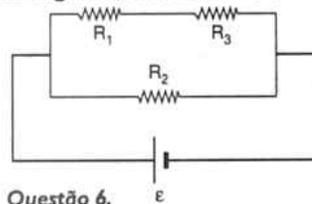
- Cada lâmpada consome, por segundo, a energia de 3,0 J.
- Cada coulomb que passa por uma lâmpada libera uma energia de 6,0 J.



Questão 5.

6. No circuito da figura, se $R_1 = 4,0 \Omega$; $R_2 = 4,0 \Omega$; $R_3 = 2,0 \Omega$ e $\epsilon = 24 \text{ V}$, qual é o calor gerado, por efeito Joule, em cada segundo, nas resistências:

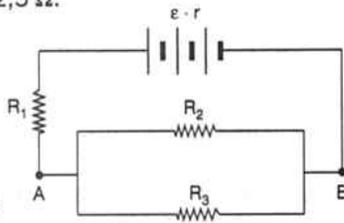
- a) 100 J
- b) $2,4 \times 10^2 \text{ J}$
- c) 12 W
- d) 58 J
- e) 60 W



Questão 6.

7. Na associação elétrica indicada na figura, determine a potência térmica dissipada entre os pontos A e B, sabendo que: $\epsilon = 30 \text{ V}$; $r = 0,50 \Omega$; $R_1 = 7,5 \Omega$; $R_2 = 10 \Omega$; $R_3 = 2,5 \Omega$.

- a) 12 W
- b) 18 W
- c) 22,5 W
- d) 90 W
- e) Nenhum dos valores anteriores.

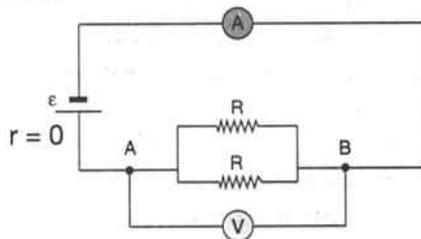


Questão 7.

8. Se lhe são fornecidas duas resistências, de mesmo material, R_1 e R_2 , e uma bateria de força eletromotriz ϵ de resistência interna nula, então a maior dissipação de energia da bateria devida ao efeito Joule:

- a) É obtida ligando-se R_1 e R_2 em série com a bateria, já que a corrente é constante.
- b) Depende da temperatura em que foi feita a experiência.
- c) É obtida ligando-se R_1 e R_2 em paralelo com a bateria, pois assim a corrente é menor.
- d) Depende apenas do valor inicial de ϵ e a ligação de R_1 e R_2 pode ser em série ou em paralelo.
- e) É obtida ligando-se as duas resistências em paralelo, pois a resistência resultante será menor que qualquer das resistências.

9. Se as duas resistências do circuito da figura fossem substituídas por outras duas de metade do seu valor:



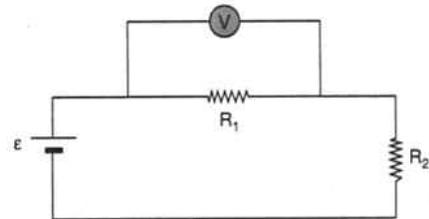
Questão 9.

- a) O amperímetro mediria uma corrente quatro vezes maior.
- b) O amperímetro mediria uma corrente igual à anterior.

- c) O voltímetro mediria uma tensão duas vezes maior que a anterior.
- d) O voltímetro mediria uma tensão igual à anterior.
- e) Nenhuma afirmativa é certa.

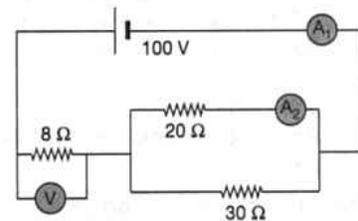
10. Conhecendo-se, no circuito representado, a resistência R_1 , a força eletromotriz ϵ da bateria, de resistência interna desprezível e a leitura V do voltímetro, de alta resistência interna, o valor de R_2 será:

- a) $\frac{V}{R_1}$
- b) $\frac{\epsilon R_1}{V}$
- c) $\frac{\epsilon}{R_1}$
- d) $\frac{\epsilon - V}{R_1}$
- e) $\frac{\epsilon - V}{V} R_1$



Questão 10.

11. No circuito da figura, as leituras do voltímetro V e dos amperímetros A_1 e A_2 são, respectivamente:

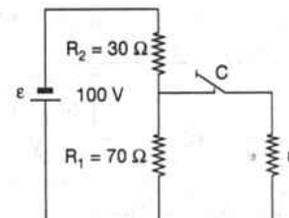


Questão 11.

- a) 10 V; 8 A; 5 A
- b) 20 V; 6 A; 4 A
- c) 30 V; 5 A; 3 A
- d) 40 V; 5 A; 3 A
- e) 40 V; 5 A; 5 A

12. No esquema da figura, ϵ é uma fonte de tensão constante. A diferença de potencial entre os extremos de R_1 , estando aberta a chave C , é igual ao dobro da que seria, se a chave estivesse fechada. Assim, considerando os valores indicados no esquema, a diferença de potencial nos extremos do resistor R_2 , estando a chave C fechada, tem o valor, em volts, igual a:

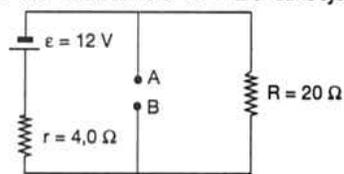
- a) 65
- b) 60
- c) 50
- d) 30
- e) 15



Questão 12.

13. Determine a resistência X do resistor que, colocado entre A e B (veja a figura), faz com que a corrente no resistor de resistência $R = 20 \Omega$ seja $0,30 \text{ A}$.

- a) $X = 5,0 \Omega$
 b) $X = 10 \Omega$
 c) $X = 15 \Omega$
 d) $X = 20 \Omega$
 e) $X = 25 \Omega$



Questão 13.

14. Um gerador de corrente contínua de força eletromotriz constante e igual a 110 V e resistência interna 1Ω , fornece corrente a um circuito que consiste de um resistor de 10Ω mergulhado num recipiente de capacidade térmica desprezível que contém $1,20 \text{ kg}$ de água a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (equivalente mecânico da caloria $4,2 \text{ J/cal}$). O tempo gasto para a água atingir $60 \text{ }^\circ\text{C}$ é:

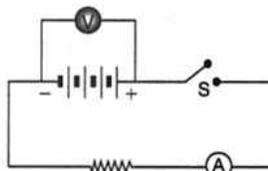
- a) 102 s
 b) 170 s
 c) $3,36 \text{ min}$
 d) $5,81 \text{ min}$
 e) 200 min

15. Uma bateria tem uma f.e.m. de 12 V e uma resistência interna de $0,50 \Omega$. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são corretas:

- I. Se apenas um voltímetro, de grande resistência interna, for ligado aos pólos da bateria, a leitura do voltímetro será 12 V .
 II. Se a bateria está fornecendo a um circuito uma corrente de $4,0 \text{ A}$, a voltagem entre seus pólos é de 10 V .
 III. A corrente máxima que a bateria pode fornecer é de 24 A .

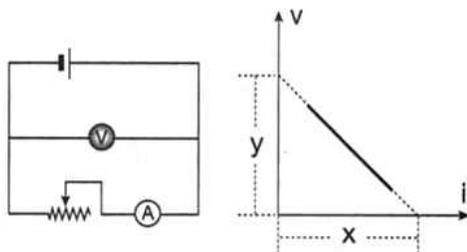
16. No circuito representado na figura, o voltímetro V mede $1,48 \text{ V}$ quando a chave S está aberta. Fechando-se essa chave, a leitura do voltímetro passa a ser $1,34 \text{ V}$ e o amperímetro A mede uma corrente de $1,40 \text{ A}$. Conclui-se que os valores da força eletromotriz e da resistência interna da bateria são, respectivamente:

- a) $1,48 \text{ V}$ e $0,14 \Omega$
 b) $1,34 \text{ V}$ e $0,14 \Omega$
 c) $1,48 \text{ V}$ e $0,10 \Omega$
 d) $1,34 \text{ V}$ e $0,10 \Omega$
 e) $1,48 \text{ V}$ e $1,4 \Omega$



Questão 16.

As questões 17 e 18 referem-se ao enunciado e à figura seguinte:



O diagrama mostra o circuito usado em uma experiência para determinar a f.e.m. e a resistência interna de uma bateria. O gráfico mostra como a diferença de potencial entre os terminais da bateria varia com a corrente i , indicada pelo amperímetro, à medida que se faz variar a resistência, através do reostato. Os valores de x e de y representam as interseções do gráfico com os eixos, como se vê na figura.

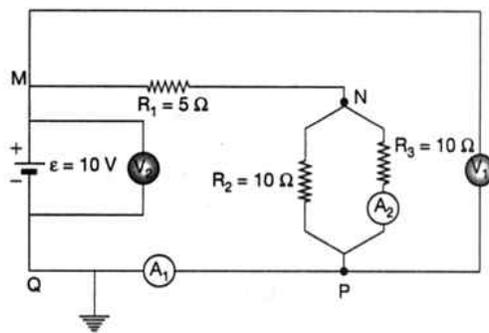
17. A f.e.m. da bateria é:

- a) $\frac{xy}{2}$
 b) $\frac{x}{y}$
 c) $\frac{y}{x}$
 d) y
 e) x

18. A resistência interna da bateria vale:

- a) x
 b) y
 c) x/y
 d) y/x
 e) $xy/2$

As questões de 19 a 25 referem-se aos seguintes enunciado e figura:



Considere o diagrama acima no qual A_1 e A_2 são amperímetros (de resistências desprezíveis) e V_1 e V_2 são voltímetros (de resistências praticamente infinitas). A resistência interna da bateria é desprezível. O ponto onde o circuito está ligado à Terra é considerado como nível de potencial ($V = 0$).

19. A resistência total do circuito é:

- a) 10Ω
 b) 25Ω
 c) $4,0 \Omega$
 d) $5,2 \Omega$
 e) $2,5 \Omega$

20. A corrente fornecida pela bateria é:

- a) $1,0 \text{ A}$
 b) $0,4 \text{ A}$
 c) $2,5 \text{ A}$
 d) $1,9 \text{ A}$
 e) $4,0 \text{ A}$

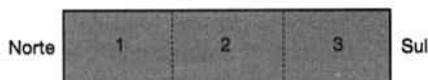
21. Indique a afirmação errada:

- a) As leituras de V_1 e V_2 são iguais.
 b) A leitura de V_1 é 10 V .
 c) A voltagem entre M e N é igual à voltagem entre N e P .
 d) O potencial do ponto P é 10 V .
 e) Retirando uma das resistências de 10Ω do circuito, a leitura de V_1 não se modifica.

22. Indique a afirmativa *errada*:
- A corrente que passa em R_1 é lida em A_1 .
 - A leitura de A_2 é 0,5 A.
 - A corrente que entra em M é a mesma que sai em P .
 - Substituindo V_1 por uma resistência de 10Ω , a leitura de A_2 aumenta.
 - Retirando R_3 do circuito, a leitura de A_1 diminui.
23. Se a resistência interna da bateria *não* fosse desprezível, poderíamos afirmar:
- A leitura de V_2 seria 10 V.
 - A leitura de V_1 seria menor do que a de V_2 .
 - A leitura de V_1 seria menor do que 10 V.
 - A leitura de V_1 seria maior do que a de V_2 .
 - A f.e.m. da bateria seria menor do que 10 V.
24. Sejam P_1 , P_2 e P_3 as potências dissipadas respectivamente nas resistências R_1 , R_2 e R_3 e i a corrente fornecida pela bateria. A afirmativa *correta* é:
- $\epsilon i < P_1 + P_2 + P_3$
 - $P_1 > P_2$
 - $\frac{1}{P_1} = \frac{1}{P_2} + \frac{1}{P_3}$
 - $\epsilon i = P_1 + \frac{P_2 \times P_3}{P_2 + P_3}$
 - $\epsilon i = (R_1 + R_2 + R_3)i^2$
25. Suponha que todos os fios que constituem as resistências do circuito tivessem as áreas de suas seções retas multiplicadas por 2. A corrente fornecida pela bateria seria, então, multiplicada por:
- 6
 - 2
 - 4
 - 1/16
 - 1/2

CAPÍTULO 22 — O campo magnético — 1ª parte

1. Um ímã permanente, cujos pólos norte e sul estão indicados na figura, é dividido em três partes iguais, 1, 2 e 3. Podemos afirmar:
- A parte 1 terá dois pólos norte, pois sua extremidade direita ficará muito próxima do pólo norte original.
 - A parte 2 será constituída de um pólo norte à direita e um pólo sul à esquerda.
 - A parte 3 terá somente um pólo sul, à direita, já que não é possível a formação de um novo pólo quando um ímã é cortado.
 - Cada parte constituirá um ímã independente, alternando-se os pólos norte e sul.
 - As partes 1 e 3 formarão dois novos ímãs, mas não a parte 2.



Questão 1.

2. Três barras de ferro geometricamente iguais são caracterizadas pelas letras A , B e C e os extremos das mesmas são indicados, respectivamente, pelas letras A_1 e A_2 , B_1 e B_2 e C_1 e C_2 . Verificamos que os extremos:
- A_1 e B_1 sofrem atração
 - A_1 e C_2 sofrem repulsão
 - A_1 e B_2 sofrem atração
 - A_1 e C_1 sofrem atração

Podemos dizer que:

- Todas as barras são ímãs permanentes.
 - Só a barra A é um ímã permanente.
 - Só a barra B é um ímã permanente.
 - As barras A e B são ímãs permanentes.
 - As barras A e C são ímãs permanentes.
3. Assinale a opção *correta*:
- Em um ímã existem cargas magnéticas positivas e negativas, separadas por uma distância igual ao comprimento do ímã.
 - Se cortarmos um ímã ao meio, isolamos o pólo norte do pólo sul.
 - A agulha magnética de uma bússola é um ímã que se orienta na direção do campo magnético terrestre.
 - O pólo norte da agulha imantada de uma bússola aponta para o pólo norte magnético da Terra.
 - Todas as proposições anteriores estão erradas.
4. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*:
- Uma carga elétrica num campo magnético sempre sofre a ação de uma força magnética.
 - Uma carga elétrica num campo elétrico sempre sofre a ação do campo elétrico.
 - A força magnética é sempre perpendicular à velocidade de uma carga elétrica num campo magnético, desde que a direção da velocidade da carga elétrica *não* seja a mesma do campo magnético.

5. Uma partícula, eletrizada positivamente, é lançada num campo magnético uniforme, de indução \vec{B} , paralelamente às linhas de indução e com sentido oposto ao de \vec{B} . A partícula fica sob a ação exclusiva do campo magnético. A respeito do movimento desta partícula podemos afirmar:
- É retilíneo e uniforme.
 - É retilíneo e uniformemente acelerado.
 - É retilíneo e uniformemente retardado.
 - É circular e uniforme.
 - É helicoidal e uniforme.

Consideremos uma partícula eletrizada e um campo magnético uniforme. Inicialmente a partícula é lançada na direção e no sentido do campo magnético. Essa situação refere-se às questões 6 e 7.

6. O movimento da partícula será:

- Retilíneo e uniforme.
- Retilíneo e retardado.
- Retilíneo e acelerado.
- Circular e uniforme.
- Não sei.

7. A energia cinética da partícula:

- Aumenta.
- Diminui.
- Permanece constante.
- É nula.
- Não sei.

8. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas

Um próton é lançado numa região onde existe um campo magnético uniforme. Sua trajetória pode ser:

- Uma reta.
- Uma parábola.
- Uma circunferência.

9. Como você deve saber, em sua sala de aula existe um campo magnético horizontal, dirigido do sul para o norte, que é o campo magnético da Terra. Então, se um feixe de elétrons for lançado horizontalmente, de leste para oeste, dentro desta sala, devemos observar este feixe:

- Desviar-se para cima.
- Desviar-se para baixo.
- Desviar-se para o norte.
- Desviar-se para o sul.
- Continuar a se mover sem desvio.

10. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são corretas

Um próton, um dêuteron (núcleo do deutério) e uma partícula alfa (núcleo de hélio) são lançados com a mesma velocidade \vec{v} em um campo magnético uniforme \vec{B} . Considere que \vec{v} é perpendicular a \vec{B} .

- A força magnética no próton será maior do que a força magnética na partícula alfa.
- O raio da trajetória do próton será maior do que o raio da trajetória do dêuteron.
- Ao emergirem do campo magnético, a velocidade da partícula alfa será menor do que a do próton.

11. Uma partícula de carga q e massa m desloca-se com movimento circular sob a ação exclusiva de um campo de indução magnética uniforme de intensidade $|B|$. Nestas condições, pode-se afirmar que:

- Este movimento é uniformemente acelerado.
- O trabalho realizado pela força magnética, num período, é positivo.

c) O trabalho realizado pela força magnética, num período, é negativo.

d) O movimento é circular e uniforme com velocidade angular diretamente proporcional a q/m .

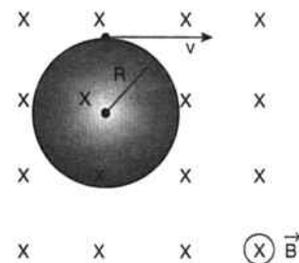
e) O movimento é circular e uniforme com velocidade angular independente de $|B|$.

12. Um elétron (carga q e massa m) é lançado com velocidade v , perpendicularmente a um campo magnético B , descrevendo um círculo de raio R (veja a figura). Se duplicarmos o valor de v , qual será o valor do raio?

Dados: força magnética: qvB

força centrípeta: mv^2/R

- R
- $2R$
- $4R$
- $R/2$
- $R/4$



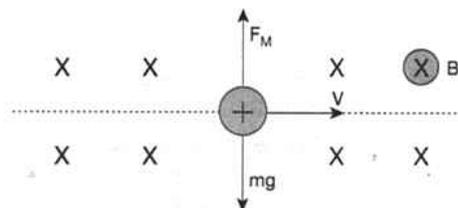
Questão 12.

13. Uma partícula eletrizada com carga elétrica q e massa m penetra, com velocidade v , num campo magnético de intensidade B , perpendicularmente ao vetor \vec{B} . A trajetória da partícula é:

- Uma circunferência de raio mv/qB .
- Uma circunferência de raio $2mv/qB$.
- Uma circunferência de raio $mv/2qB$.
- Uma parábola.
- Uma curva helicoidal.

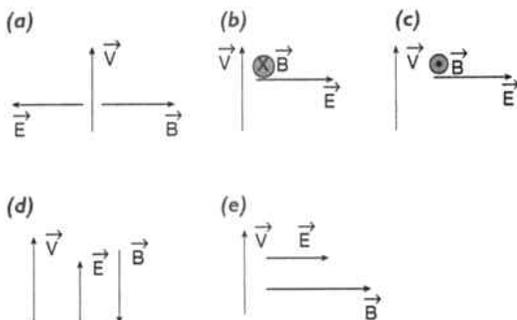
14. Uma partícula, de massa $m = 1 \text{ g}$ e com carga $q = 1 \mu\text{C}$ é lançada com uma velocidade $v = 10^3 \text{ m/s}$ em um campo magnético \vec{B} , uniforme, como mostra a figura. Verificamos que a partícula move-se em linha reta, em virtude da força magnética \vec{F}_M equilibrar o peso $m\vec{g}$ da partícula. Considerando $g = 10 \text{ m/s}^2$, podemos afirmar que o valor de \vec{B} é:

- 10^{-2} T
- $0,5 \text{ T}$
- 10 T
- 10^3 T
- 50 T



Questão 14.

15. Um feixe de elétrons, com velocidade \vec{v} , penetra numa certa região do espaço, onde existem um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} , atuando simultaneamente. Indique dentre os diagramas seguintes o que tem possibilidade de satisfazer a condição de que o feixe de elétrons não sofra desvio em sua trajetória.



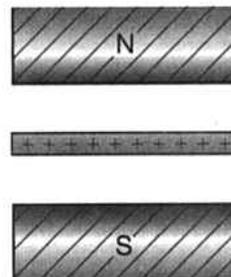
Questão 15.

16. Uma partícula carregada eletricamente é lançada com velocidade \vec{v} , em uma certa região do espaço onde existe um campo magnético \vec{B} e um campo elétrico \vec{E} . A afirmação errada é:

- a) Conforme a direção de \vec{v} , \vec{B} e \vec{E} , a partícula poderá não sofrer nenhuma deflexão.
- b) A força que atua sobre a partícula, devido à ação de \vec{B} , é sempre perpendicular a \vec{v} .
- c) A força que atua sobre a partícula, devido ao campo \vec{B} , será máxima quando \vec{v} e \vec{B} forem perpendiculares.
- d) A força que atua na partícula, devido ao campo \vec{E} , permanece constante, mesmo que a direção de \vec{v} varie.
- e) Qualquer que seja a direção de \vec{v} , haverá sempre uma força resultante atuando sobre a partícula.

17. Se o condutor retilíneo, feito de cobre, carregado com uma carga $+Q$, representado na figura, está em repouso em relação ao campo \vec{B} , podemos afirmar com certeza de acertar:

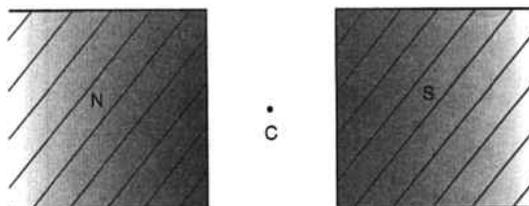
- a) Sobre o condutor atua uma força de natureza elétrica ou magnética de mesma direção e mesmo sentido que o campo \vec{B} .
- b) Sobre o condutor atua uma força de natureza elétrica ou magnética, de mesma direção e sentido contrário ao do vetor \vec{B} .
- c) Sobre o condutor atua uma força de natureza elétrica ou magnética, perpendicular a \vec{B} e perpendicular ao condutor.
- d) Sobre o condutor não atua força resultante alguma de natureza elétrica ou magnética.
- e) O vetor \vec{B} atuará sobre o condutor, fazendo aparecer uma corrente elétrica ao longo do mesmo.



Questão 17.

18. Um condutor, C, colocado entre os pólos de um ímã (veja a figura), perpendicularmente ao plano do papel e atravessado por uma corrente que penetra no papel, fica sujeito a uma força cuja direção e sentido podem ser representados pela seta:

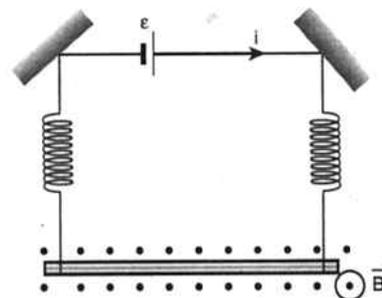
- a) \uparrow
- b) \downarrow
- c) \rightarrow
- d) \nearrow
- e) \searrow



Questão 18.

19. A figura mostra uma barra metálica horizontal, de comprimento $\ell = 50$ cm e peso $P = 3,0$ N, suspensa por molas também metálicas de constante elástica $k = 5,0$ N/m cada, em uma região onde atua um campo de indução magnética uniforme \vec{B} , horizontal e perpendicular à barra. Sabendo-se que a barra conduz uma corrente $i = 6,0$ A, calcule a intensidade B da indução magnética, para que as molas, no equilíbrio, fiquem esticadas de 15 cm.

- a) 3,0 T
- b) 1,5 T
- c) 1,0 T
- d) 0,50 T
- e) 6,0 T

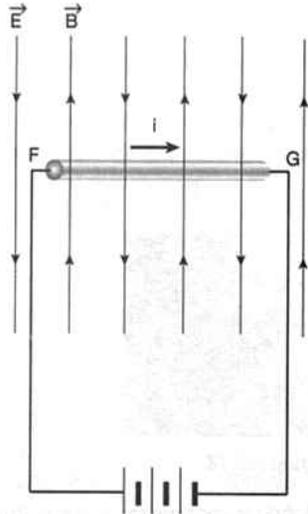


Questão 19.

20. Um fio metálico FG, percorrido por uma corrente i , é colocado horizontalmente em uma região onde existem um campo elétrico uniforme \vec{E} , vertical, para baixo, e um campo magnético também uniforme, \vec{B} , vertical, para cima, como mostra a figura desta questão. Considerando as ações dos campos

\vec{E} e \vec{B} sobre o fio, pode-se concluir que sobre FG estará atuando:

- Uma força elétrica para baixo e uma força magnética para cima.
- Uma força elétrica para cima e uma força magnética para baixo.
- Apenas uma força elétrica para baixo.
- Apenas uma força magnética para cima.
- Apenas uma força magnética horizontal, apontando para o leitor.

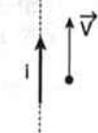


Questão 20.

CAPÍTULO 23 — O Campo magnético - 2ª parte

- Um próton é lançado com uma velocidade \vec{v} paralela a um fio reto e comprido, percorrido por uma corrente elétrica i . No instante mostrado na figura, o vetor que representaria a força magnética que o campo criado pela corrente exerce no próton seria:

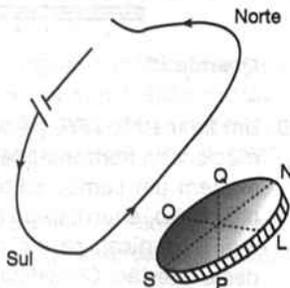
- \uparrow
- \rightarrow
- \leftarrow
- \downarrow
- Um vetor penetrando no papel.



Questão 1.

- O diagrama mostra um fio colocado na direção sul-norte, acima e próximo a uma bússola. Quando o circuito é fechado, o pólo norte da agulha da bússola estará apontando, aproximadamente, para a direção:

- LO
- SN
- NS
- PQ
- OL



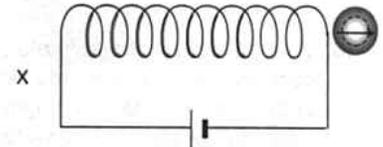
Questão 2.

- Sejam dois fios de comprimento infinito, condutores, de seção reta desprezível, paralelos, separados por uma distância d . Se em algum ponto situado entre os fios o campo magnético for nulo, quando os mesmos são percorridos por uma corrente elétrica, podemos concluir:

- As correntes têm o mesmo sentido.
- As correntes têm sentidos contrários.
- As intensidades das correntes são iguais.
- O enunciado da questão está errado porque a indução magnética nunca poderá ser zero em algum ponto da distância d entre as correntes.
- Podemos tirar algumas conclusões, mas todas apresentadas acima estão erradas.

- Na figura, temos uma bússola diante de uma bobina na qual passa uma corrente contínua de grande intensidade. Se a bússola for deslocada para a posição X o ponteiro da bússola indicará a seguinte direção:

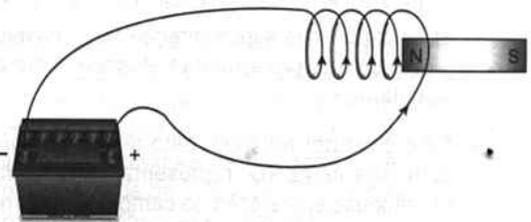
- \rightarrow
- \uparrow
- \downarrow
- \leftarrow
- \nearrow



Questão 4.

- A figura mostra um ímã nas proximidades de uma bobina. Logo após o circuito ser fechado, podemos afirmar que:

- Não haverá corrente na bobina.
- O ímã será expulso da bobina.
- O ímã permanecerá como está.
- O ímã será atraído para dentro da bobina.
- O ímã terá polarização invertida.



Questão 5.

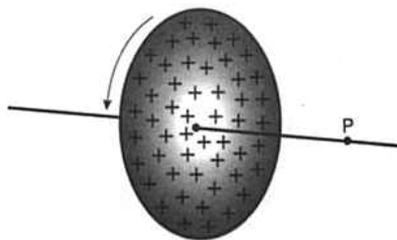
- Os astronautas que chegaram à Lua constataram que não existe um campo magnético lunar. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*

- Ao se deslocar na superfície da Lua, um astronauta poderá se orientar mais facilmente do que na Terra, usando uma agulha magnética.
- Na Lua, uma agulha imantada não sofreria deflexão ao ser colocada nas proximidades de um fio percorrido por uma corrente elétrica.
- Os campos magnéticos dos átomos e núcleos dos elementos existentes na Lua devem ser nulos também.

7. Um disco de material isolante é eletrizado uniformemente com uma carga positiva. Esse disco encontra-se, inicialmente, em repouso. Em seguida, é colocado em rotação, com alta frequência, em torno de um eixo perpendicular ao seu plano e que passa pelo centro dele, como mostra a figura. Suponha um ponto P situado sobre o eixo e próximo ao disco.

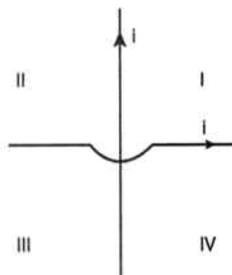
Considerando essas informações, pode-se afirmar que as cargas elétricas no disco estabelecem em P :

- Apenas um campo magnético, se o disco estiver parado.
- Apenas um campo elétrico, se o disco estiver em rotação.
- Um campo elétrico e um campo magnético, se o disco estiver parado.
- Apenas um campo magnético, se o disco estiver em rotação.
- Um campo elétrico e um campo magnético, se o disco estiver em rotação.



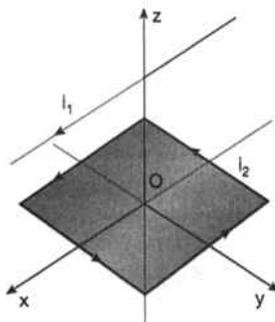
Questão 7.

8. A figura mostra dois fios retos e longos, perpendiculares entre si, cada um percorrido por uma corrente i , de mesma intensidade, com os sentidos indicados. Na regiões I, II, III e IV podem existir pontos nos quais o campo magnético resultante, criado pelas correntes, é nulo. Essas regiões são:



Questão 8.

- I e II
- I e III
- I e IV
- II e III
- II e IV

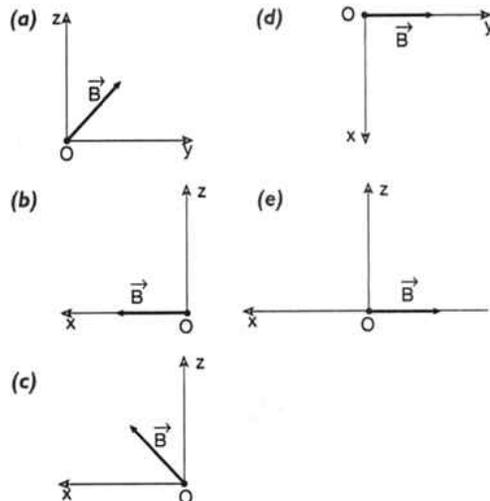


Questões 9 e 10.

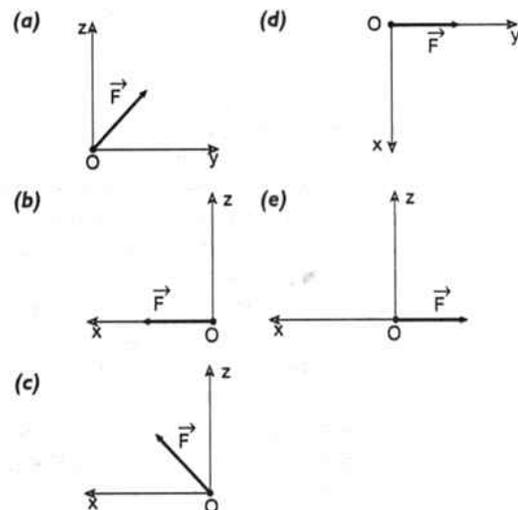
Para as questões 9 e 10, considere a figura correspondente a elas, que mostra um fio longo e reto, per-

corrido por uma corrente i_1 , e uma espira quadrada, percorrida por uma corrente i_2 . O fio está no plano XOZ , sendo paralelo ao eixo OX , e a espira está no plano XOY .

9. A direção e o sentido do campo magnético resultante \vec{B} , estabelecido no ponto O pelas correntes no fio e na espira, são melhor representados por:



10. Um elétron passa pelo ponto O com uma velocidade \vec{v} dirigida para cima, ao longo do eixo OZ . A direção e o sentido da força magnética resultante, \vec{F} , sobre o elétron, são melhor representados por:

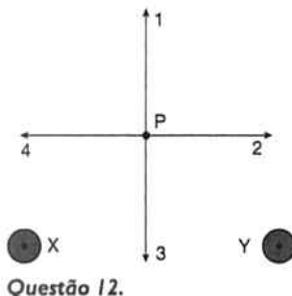


11. Uma bobina, percorrida por uma corrente contínua, tem em seu interior uma barra metálica (núcleo do eletroímã), destinada a aumentar consideravelmente a intensidade do campo magnético produzido pelo dispositivo. Para que isso ocorra, o metal do núcleo deve ser:

- Cobre
- Alumínio
- Ferro
- Chumbo
- Prata

12. A figura mostra dois condutores longos, X e Y, perpendiculares ao plano da página, percorridos por correntes elétricas contínuas de iguais intensidades e sentidos para fora da página. No ponto P, equidistante dos fios, o sentido do vetor campo magnético resultante, produzido pelas duas correntes, está corretamente indicado pela seta:

- a) 1
b) 2
c) 3
d) 4
e) Entrando na página.



13. Os pontos A, B e P da figura estão no plano da página. Qual das alternativas abaixo melhor descreve uma situação em que é produzido um campo magnético perpendicular à página e saindo dela no ponto P?

- a) Elétrons movimentando-se de B para A. ● A
b) Uma carga positiva em A e uma negativa em B, ambas em repouso. ● P
c) Um ímã permanente com o pólo norte em A e o sul em B. ● B
d) Um ímã permanente com o pólo norte em B e o sul em A.
e) Prótons movimentando-se de B para A.

Questão 13.

14. Seja \vec{E}_0 o campo elétrico uniforme, no ar, entre duas placas planas e paralelas e \vec{B}_0 o campo magnético uniforme, no ar, no interior de um solenóide percorrido por uma corrente contínua. Suponha que o espaço entre as placas seja totalmente preenchido com um dielétrico (sem alterar as cargas nas placas) e que o interior do solenóide seja também totalmente preenchido com uma substância paramagnética (sem alterar a corrente nas espiras). Sendo \vec{E} e \vec{B} os campos elétrico e magnético, entre as placas e no interior do solenóide, nas novas situações, temos:

- a) $E > E_0$ e $B < B_0$ d) $E > E_0$ e $B = B_0$
b) $E < E_0$ e $B < B_0$ e) $E = E_0$ e $B > B_0$
c) $E < E_0$ e $B > B_0$

CAPÍTULO 24 — Indução eletromagnética - ondas eletromagnéticas

1. Constitui indução eletromagnética:

- a) O aparecimento de um campo magnético devido ao movimento de cargas elétricas.

- b) O aparecimento de uma força eletromotriz devido à variação com o tempo de um campo magnético.
c) O aparecimento de um campo magnético devido à variação com o tempo de um campo elétrico.
d) A separação de cargas elétricas de um corpo neutro quando se lhe aproxima uma carga elétrica.
e) O aparecimento de uma força sobre uma carga elétrica em movimento num campo magnético. Esta força é perpendicular ao campo e à velocidade.

2. Considere as seguintes situações:

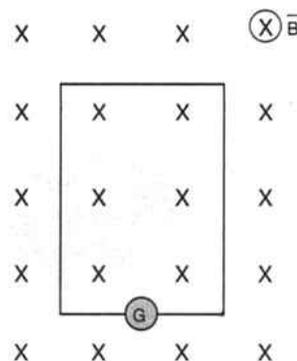
- I. Uma espira de fio condutor, circundando um fio retilíneo, no qual passa uma corrente contínua.
II. Um ímã caindo e passando através da área limitada por uma espira de fio condutor.
III. Uma esfera carregada com uma carga constante Q, situada no centro de uma espira de fio condutor.

Qual ou quais das situações acima faz aparecer uma corrente elétrica circulando na espira de fio?

- a) Apenas I. d) Apenas I e III.
b) Apenas II. e) Apenas II e III.
c) Apenas III.

3. Um campo magnético uniforme, \vec{B} , é perpendicular ao plano deste papel e dirigido para baixo. Uma espira condutora, fechada sobre um galvanômetro G, é mergulhada no campo com o seu plano paralelo ao plano deste papel (veja a figura). O galvanômetro indicará uma força eletromotriz induzida na espira, em todas as situações indicadas abaixo, exceto:

- a) Se o sentido de \vec{B} sofrer inversões sucessivas e a espira permanecer em repouso.
b) Enquanto a espira estiver girando em torno de um dos seus lados.
c) Enquanto a espira permanecer em repouso na posição primitiva.
d) Enquanto a espira for deformada de maneira que sua área sofra variações.
e) Se o módulo de \vec{B} variar continuamente e a espira permanecer em repouso.

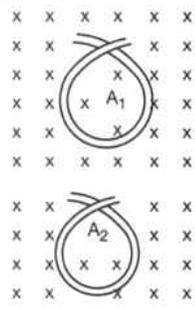


Questão 3.

4. Um quadro retangular, de dimensões 8,0 cm e 12 cm, é colocado perpendicularmente a um campo magnético de intensidade $4,0 \times 10^{-3}$ tesla. A intensidade do campo magnético é reduzida a zero em 12 segundos. A força eletromotriz média induzida neste intervalo de tempo é de:

- a) $9,6 \times 10^{-7}$ V c) $1,8 \times 10^{-6}$ V e) $4,5 \times 10^{-4}$ V
- b) $3,2 \times 10^{-6}$ V d) $3,2 \times 10^{-3}$ V

5. Na figura, considere o vetor indução magnética \vec{B} , uniforme, constante em relação ao tempo, de módulo $0,40$ weber/m², normal ao plano do papel. Neste plano está uma espira cujo comprimento pode aumentar ou diminuir, limitando, assim, uma área variável. Se a variação da área se faz continuamente em $1,00 \times 10^{-1}$ s, passando do valor $A_1 = 1,20 \times 10^{-2}$ m² para o valor $A_2 = 3,00 \times 10^{-3}$ m², qual será o valor absoluto da força eletromotriz média, induzida na espira?



- a) Nula.
- b) $3,0 \times 10^{-1}$ V
- c) $3,6 \times 10^{-2}$ V
- d) $5,0 \sqrt{2} \times 10^{-2}$ V
- e) Faltam dados para se calcular o valor pedido.

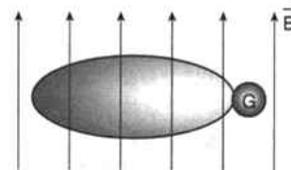
Questão 5.

6. Uma espira circular, de raio $R = 10$ cm, está mergulhada num campo magnético uniforme de $B = 0,10$ weber/m², sendo o plano da espira perpendicular a \vec{B} . Quando B é reduzido a zero, observa-se na espira uma força eletromotriz induzida de $1,0$ V. O tempo médio gasto para B ser reduzido a zero é:

- a) 62,8 s
- b) $3,14 \times 10^{-3}$ s
- c) $1,0 \times 10^{-3}$ s
- d) 0,1 s
- e) Inversamente proporcional à resistência da espira.

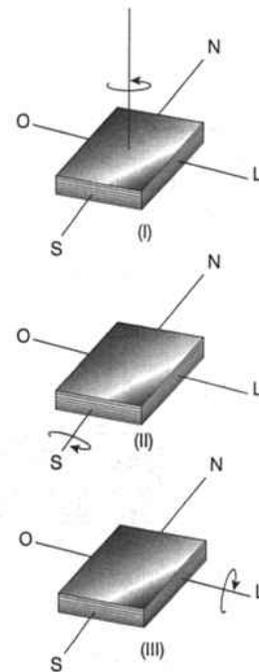
7. Um condutor, formando um circuito fechado, está situado dentro de um campo variável \vec{B} , de tal modo que exista um fluxo magnético através do condutor (veja a figura). A f.e.m. induzida no circuito:

- a) Não é influenciada pela rapidez com que \vec{B} variar.
- b) É tanto maior quanto maior for o valor de \vec{B} .
- c) Tende sempre a fazer decrescer o fluxo magnético através dele.
- d) Poderá ser diferente de zero no instante em que o valor de \vec{B} se anular.
- e) Será constante e diferente de zero, se o fluxo magnético através do circuito permanecer constante.



Questão 7.

8. Numa região onde o campo magnético da Terra pode ser considerado uniforme e dirigido no sentido de sul para norte, um estudante tenta produzir corrente elétrica, girando uma bobina retangular no sentido indicado na figura pela seta. Em qual(is) da(s) situação(ões) abaixo o estudante não poderá detectar corrente?



Questão 8.

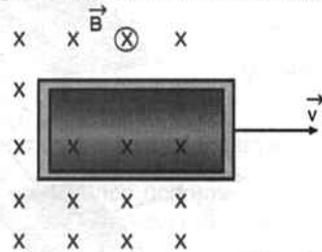
- a) I somente
- b) II somente
- c) III somente
- d) I e II somente
- e) I, II e III

9. Em que ordem os fatos relacionados a seguir se sucedem para dar origem à energia elétrica usada para fazer girar um motor?

- I. Um condutor no qual passa corrente elétrica é convenientemente colocado em um campo magnético, ficando sujeito a uma força.
- II. O aquecimento da água pela energia solar e a ação dos ventos produzem nuvens e chuvas.
- III. O movimento relativo entre um ímã e um condutor, enrolado em forma de espiras, dá origem a uma força eletromotriz.

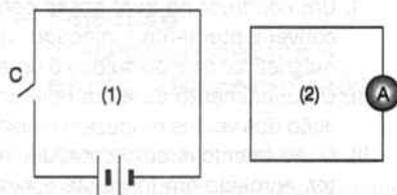
- IV. A energia elétrica é transportada a distância ao longo de fios condutores.
 V. Reações nucleares, no interior do Sol, produzem a energia que é irradiada sob a forma de ondas eletromagnéticas.
 VI. A água cai de certa altura, acima de um dado nível, transferindo sua energia potencial e fazendo girar uma roda.
- a) V, II, VI, III, IV, I d) II, VI, V, IV, III, I
 b) V, II, VI, I, IV, III e) II, VI, I, III, IV, V
 c) V, VI, II, I, IV, III

10. A figura desta questão mostra uma espira metálica rígida, situada no plano do papel, sendo deslocada para a direita, com uma velocidade vetorial \vec{v} . A espira está saindo de um campo magnético \vec{B} , uniforme, constante em relação ao tempo, normal ao seu plano, e entrando na folha de papel. Podemos dizer que na espira:
- a) Aparecerá uma corrente induzida, no sentido horário.
 b) Aparecerá uma corrente induzida, no sentido anti-horário.
 c) Aparecerá uma corrente alternada.
 d) Não aparecerá corrente induzida.
 e) Aparecerá uma corrente induzida, porém não temos condições de determinar o seu sentido.



Questão 10.

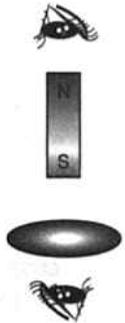
11. Analisando a figura desta questão e sabendo que as espiras 1 e 2 são condutoras e estão no plano do papel, podemos dizer que as seguintes afirmativas estão corretas
- I. No instante em que a chave C é fechada, o sentido da corrente na espira (2) será horário.
 II. No instante em que a chave C é aberta, o sentido da corrente na espira (2) será horário.
 III. Enquanto a chave C permanece fechada e o conjunto constituído pelo circuito (1) e pela espira (2) move-se para a direita, ambos com a mesma velocidade, o sentido da corrente na espira (2) é anti-horário.



Questão 11.

12. Um ímã é largado do teto ao longo do eixo vertical de uma espira de cobre, fixa num plano horizontal, a certa altura do solo (veja a figura). Assinale a afirmação correta

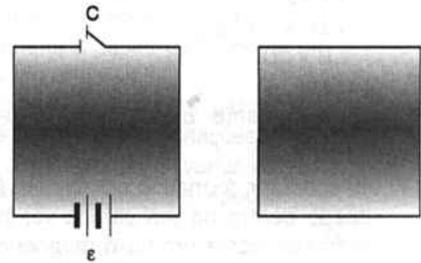
- a) Durante todo o percurso do ímã até o solo não aparecerá corrente induzida na espira.
 b) Se o ímã caísse com velocidade constante a corrente induzida teria valor constante.
 c) Quando o ímã se aproximar da espira aparecerá uma corrente induzida no sentido horário para quem vê do solo.
 d) Quando o ímã se afastar da espira aparecerá uma corrente induzida no sentido anti-horário para quem vê do teto.
 e) Se a experiência fosse realizada com a polaridade do ímã trocada, os efeitos seriam idênticos.



Questão 12.

13. A figura mostra duas espiras condutoras colocadas lado a lado, no mesmo plano. Quando se fecha a chave C na espira da esquerda, começa a passar nela uma corrente elétrica. De acordo com a lei de Faraday-Lenz (para o instante em que se fecha a chave C):

- a) Aparece um acúmulo de cargas na extremidade inferior da espira da direita.
 b) Aparece uma corrente elétrica induzida na espira da direita, no sentido horário.
 c) O campo magnético da espira da esquerda não influi nada na outra espira.
 d) Aparece na espira da direita uma corrente elétrica no sentido anti-horário.
 e) Nenhuma afirmativa acima é correta.



Questão 13.

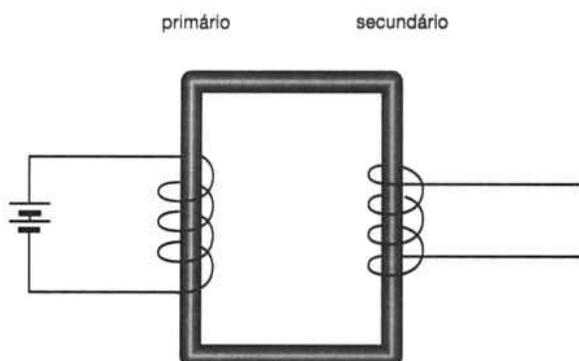
14. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são corretas:

Uma bateria de 12 V encontra-se ligada ao primário de um transformador.

- I. Existe uma corrente contínua nas espiras do primário.
 II. Não existe fluxo magnético nas espiras do secundário.
 III. A leitura de um voltímetro, ligado ao secundário, depende do número de espiras do primário.

15. Ligando-se duas pilhas de 1,5 V ao primário de um pequeno transformador, conforme mostra a figura, não haverá voltagem induzida no secundário. Qual das afirmações seguintes justifica esse fato?

- a) Existe fluxo magnético no secundário, mas ele não varia.
- b) Uma corrente contínua não produz campo magnético no núcleo de ferro.
- c) O campo magnético criado na bobina primária não atravessa o secundário.
- d) O número de espiras da bobina secundária não é suficiente.
- e) O número de pilhas no primário não é suficiente.



Questão 15.

16. As afirmativas seguintes relacionam-se com um transformador, no qual o número de espiras do secundário é maior do que o número de espiras do primário. Marque a afirmativa *falsa*

- a) Aplicando-se ao primário uma voltagem alternada, aparecerá, no secundário, uma voltagem também alternada.
- b) Aplicando-se ao primário uma voltagem constante, a voltagem no secundário será também constante e maior do que a voltagem aplicada ao primário.
- c) A voltagem que aparece no secundário é causada pela variação do fluxo magnético que atravessa as espiras do secundário.
- d) Aplicando-se ao primário uma voltagem constante, haverá um fluxo magnético constante através do secundário.
- e) Aplicando-se ao primário uma voltagem alternada, obteremos, no secundário, uma voltagem maior do que a voltagem aplicada ao primário.

17. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*

- I. Em um transformador, a voltagem que aparece nas espiras do secundário é induzida pelo fluxo magnético variável produzido pelas espiras do primário.
- II. A corrente induzida em um circuito, por uma variação do fluxo magnético, cria um campo mag-

nético que sempre tende a diminuir o fluxo existente.

III. O cobre, o chumbo e o alumínio são exemplos de substâncias ferromagnéticas.

18. Os elétrons são acelerados, adquirindo velocidades de grande valor, dentro de um tubo de televisão, por:

- a) Um campo magnético.
- b) Um filamento aquecido.
- c) Ondas de rádio.
- d) Um campo elétrico.
- e) Um intenso feixe de luz.

19. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*

- I. A velocidade de propagação da luz no vácuo é a mesma para qualquer cor, mas, em outros meios, é variável com a cor da radiação.
- II. Os raios γ são elétrons de alta energia.
- III. Os raios X são radiações desconhecidas que se pensa provirem do núcleo atômico.

20. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*

- I. No vácuo, a radiação ultravioleta propaga-se com uma velocidade maior do que as microondas.
- II. A frequência da radiação infravermelha é menor do que a da luz verde.
- III. Se a onda eletromagnética de uma emissora de rádio tem uma frequência de 750 quilohertz, o seu comprimento de onda, no ar, é de 400 m.

21. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*

As afirmações referem-se a ondas de rádio, ondas luminosas e raios X, propagando-se no vácuo.

- I. Elas apresentam comprimentos de ondas diferentes.
- II. Elas se propagam com velocidades diferentes, características de seus comprimentos de onda.
- III. Suas frequências são iguais, independentemente de seus comprimentos de onda que são diferentes.

22. Se um colega lhe disser que o índice de refração de um meio é $3/2$, você poderá comentar corretamente:

- a) A velocidade de propagação da luz neste meio vale cerca de 200 000 km/s.
- b) A frequência da luz vermelha neste meio é menor do que no vácuo.
- c) O comprimento de onda de qualquer radiação eletromagnética neste meio é maior do que o comprimento de onda respectivo no vácuo.
- d) O período de qualquer radiação eletromagnética neste meio é maior do que no vácuo.
- e) Um meio não pode ter índice de refração igual a $3/2$.

- 23.** Assinale abaixo o que não está dentro do espectro eletromagnético:
- Raios X.
 - Raios γ .
 - Raios catódicos.
 - Radiação ultravioleta.
 - Ondas de rádio.
- 24.** No vácuo, as radiações eletromagnéticas, tais como ondas de rádio, a luz, raios X e raios γ , têm o(a) mesmo(a):
- Comprimento de onda.
 - Frequência.
 - Período.
 - Velocidade.
 - Amplitude.
- 25.** Os raios γ são:
- Radiação eletromagnética de alta frequência.
 - Idênticos aos elétrons.
 - Idênticos aos elétrons, porém com carga positiva.
 - Idênticos aos elétrons, porém de alta energia.
 - Núcleos de hélio.
- 26.** Em qual dos fenômenos abaixo as ondas são longitudinais:
- Luz de *laser*.
 - Raios X.
 - Raios γ .
 - Vibração de uma corda de piano.
 - Propagação sonora no ar.
- 27.** Uma cápsula a meio caminho da Lua certamente não encontra:
- Raios cósmicos.
 - Ondas de radar.
 - Raios X.
 - Ondas sonoras.
 - Radiação ultravioleta.
- 28.** O fenômeno da difração de uma onda está envolvido nos seguintes fenômenos, exceto:
- Possibilidade de se ouvir, do interior de uma sala de um prédio, o ruído de uma batida de carro que ocorra na rua.
 - Propagação de uma onda hertziana (de rádio) de uma cidade a outra.
 - A luz branca decompõe-se ao atravessar um prisma.
 - A onda, na superfície da água, contorna obstáculos de tamanhos próximos ao comprimento de onda da onda considerada.
 - A estrutura cristalina de um sólido é estudada utilizando-se raios X.
- 29.** Abaixo são apresentados alguns princípios, ou fenômenos físicos, e algumas aplicações técnicas, ou práticas, desses princípios.

Princípios ou fenômenos físicos:

- Um condutor percorrido por uma corrente, colocado em um campo magnético, sofre a ação de uma força exercida por esse campo.
- Uma corrente elétrica em um fio estabelece um campo magnético nas proximidades desse fio.
- Uma corrente elétrica é induzida em um circuito no qual há uma variação do fluxo magnético.

Aplicações técnicas:

- Um eletroímã
- Um motor elétrico
- Um gerador de corrente alternada

Indique a alternativa em que se estabelece uma correspondência adequada entre os princípios (ou fenômenos) e as aplicações.

- I e R, II e P, III e Q.
- I e Q, II e P, III e R.
- I e P, II e Q, III e R.
- I e R, II e Q, III e P.
- I e Q, II e R, III e P.

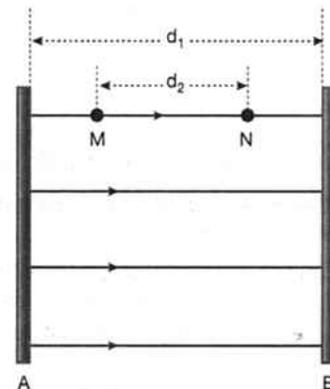
- 30.** As ondas de rádio emitidas por uma emissora AM têm frequências situadas em torno de 10^6 hertz e se propagam, no ar, com velocidade igual à da luz (300 000 km/s). O comprimento de onda da radiação emitida por essa estação de rádio tem uma dimensão mais próxima:

- Da altura de um homem.
- Da espessura de uma folha de papel.
- Do comprimento de um campo de futebol.
- Do diâmetro de uma bola de futebol.
- Do diâmetro de um lápis.

Apêndice F

As questões de **1 a 6** referem-se ao enunciado e à figura seguinte:

Na figura acham-se representadas linhas de força de um campo elétrico, \vec{E} , produzido entre as placas de um capacitor plano de capacitância C . A distância entre as placas é d_1 .



Questões 1 a 6.

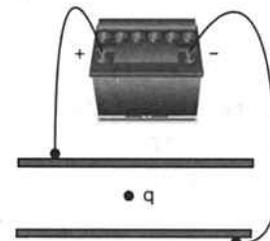
- Abandonando-se, no ponto M , uma partícula de peso desprezível, carregada positivamente, ela tomará um movimento:
 - Uniformemente acelerado, na direção das linhas de força, de M para N .
 - Uniformemente acelerado, em direção normal às linhas de força, para baixo.
 - Parabólico, a partir de M , para baixo.
 - Parabólico, a partir de M , para cima.
 - Uniforme, na direção das linhas de força, de M para N .
- Se um elétron for colocado em M , a direção e o sentido da força elétrica que atuará sobre ele serão melhor representados por:
 -
 -
 -
 -
 -
- A diferença de potencial entre os pontos M e N será dada pela expressão:
 - $\frac{E}{d_1} d_2$
 - Ed_2
 - Cd_2
 - $E(d_1 - d_2)$
 - $\frac{C}{E}(d_1 - d_2)$
- Um fio de resistência R é colocado ligando os pontos M e N . A corrente, i , que passa pelo fio, depois de um certo tempo, é:
 - $i = \frac{C}{ER}(d_1 - d_2)$
 - $i = \frac{Ed_2}{d_1 R}$
 - $i = \frac{E(d_1 - d_2)}{R}$
 - $i = 0$
 - $i = \frac{Ed_2}{R}$
- A carga Q , distribuída nas placas do capacitor, é:
 - $Q = \frac{C}{E} d_1$
 - $Q = \frac{E}{C} d_1$
 - $Q = CE d_1$
 - $Q = \frac{C}{Ed_1}$
 - $Q = \frac{CE}{d_1}$
- Uma partícula de peso desprezível de carga positiva, q , é abandonada nas proximidades de uma das placas. O trabalho que o campo elétrico

realiza sobre ela e a energia cinética que ela possui ao alcançar a outra placa são, respectivamente:

- $Ed_1 q$ e $Ed_1 q$
- $\frac{Eq}{d_1}$ e $Ed_1 q$
- $\frac{Eq}{d_1}$ e $\frac{Eq}{d_1}$
- $Ed_1 q$ e $\frac{Eq}{d_1}$
- O trabalho é $\frac{Eq}{d_1}$, mas a energia cinética não pode ser calculada sem o conhecimento da massa da partícula.

- O vetor-força que atua sobre uma carga elétrica, q , colocada entre duas grandes placas condutoras paralelas, ligadas aos terminais de uma bateria (veja a figura), não variará, se:

- Invertermos a polaridade da bateria.
- Trocamos a bateria por outra de força eletromotriz diferente.
- Aumentamos a distância entre as placas, mantendo a bateria ligada a elas.
- Variamos a posição de q , aproximando-a ou afastando-a de uma das placas.
- Após desligarmos a bateria, trocamos o meio que está entre as placas por outro de constante dielétrica diferente.

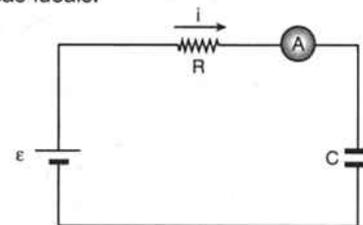


Questão 7.

- No circuito da figura qual é a carga (em coulombs) armazenada no capacitor quando o amperímetro marca uma corrente $i = 0,2$ A? O gerador e o amperímetro são ideais.

$\epsilon = 12$ V
 $R = 10$ Ω
 $C = 2 \times 10^{-3}$ F

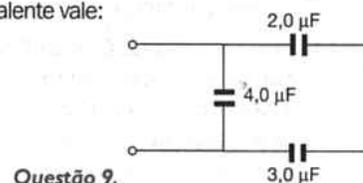
- 2×10^{-4}
- 2×10^{-2}
- 4×10^{-2}
- 2×10^{-5}
- 5×10^3



Questão 8.

- Três capacitores são ligados como mostra a figura. O capacitor equivalente vale:

- $0,92$ μ F
- $1,2$ μ F
- $5,2$ μ F
- $9,0$ μ F
- 12 μ F



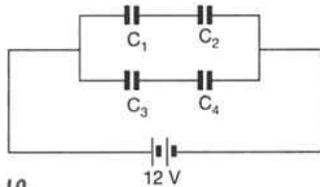
Questão 9.

10. Na figura, a bateria fornece 12 V. Determine a capacitância equivalente da associação em questão:

$$C_1 = 1,0 \mu\text{F} \quad C_3 = 3,0 \mu\text{F}$$

$$C_2 = 2,0 \mu\text{F} \quad C_4 = 4,0 \mu\text{F}$$

- a) $10 \mu\text{F}$ c) $2,1 \mu\text{F}$ e) $0,42 \mu\text{F}$
 b) $2,4 \mu\text{F}$ d) $0,5 \mu\text{F}$



Questão 10.

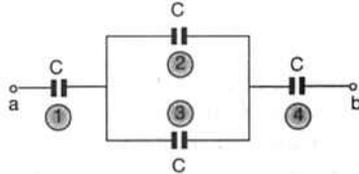
11. Com relação ao problema anterior, qual é a carga total do circuito?

- a) $2,9 \times 10^{-5} \text{ C}$ d) $6 \times 10^{-6} \text{ C}$
 b) $3,5 \times 10^{-5} \text{ C}$ e) $5 \times 10^{-6} \text{ C}$
 c) $1,2 \times 10^{-4} \text{ C}$

As informações que se seguem e o diagrama da figura referem-se às questões 12 e 13. No diagrama temos uma associação de 4 condensadores de mesma capacidade C.

12. A capacitância equivalente da associação será:

- a) 5C c) $5C/2$ e) $C/3$
 b) 4C d) $2C/5$



Questões 12 e 13.

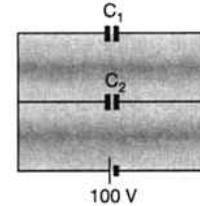
13. Se carregarmos esta associação até que a diferença de potencial entre os pontos a e b atinja um valor V, podemos afirmar com certeza:

- a) A carga elétrica armazenada em cada condensador é a mesma.
 b) A carga elétrica armazenada no condensador 1 é igual à carga elétrica armazenada no condensador 2.
 c) A carga elétrica armazenada no condensador 1 é igual à carga elétrica armazenada no condensador 4.
 d) A carga elétrica armazenada no condensador 1 é menor que a carga elétrica armazenada no condensador 2.
 e) A carga elétrica armazenada no condensador 1 é menor que a carga elétrica armazenada no condensador 4.

14. Dois capacitores, $C_1 = 2 \mu\text{F}$ e $C_2 = 3 \mu\text{F}$, são ligados em paralelo. Ligamos uma bateria de 100 V na associação (veja a figura). É *errado* afirmar que:

- a) A capacitância da associação vale $5 \mu\text{F}$.
 b) A carga na associação vale $5 \times 10^{-4} \text{ C}$.

- c) A voltagem em C_1 é 100 V e em C_2 é também 100 V.
 d) As cargas em C_1 e C_2 são iguais e valem $2,5 \times 10^{-4} \text{ C}$.
 e) A energia na associação vale $2,5 \times 10^{-2} \text{ J}$.

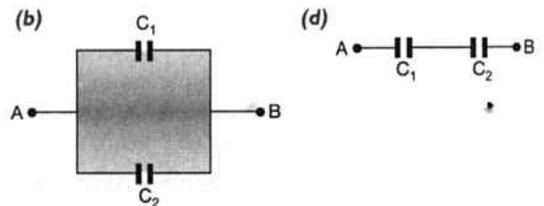


Questão 14.

15. Um capacitor carregado A é ligado em paralelo a um capacitor descarregado B. Sobre a associação resultante, é verdadeira a afirmação:

- a) Depois de associados, os capacitores têm cargas iguais.
 b) A energia da associação é igual à energia inicial de A.
 c) A capacitância da associação é menor que a soma das capacitâncias de A e B.
 d) A energia da associação é menor que a energia inicial de A.
 e) Depois de associados, o capacitor de menor capacitância terá maior carga.

16. Entre dois pontos A e B é mantida uma diferença de potencial constante. Dispondo-se de dois capacitores, de capacitâncias C_1 e C_2 , sendo $C_1 > C_2$, indique em qual das ligações seguintes teríamos a maior energia armazenada.



- e) A energia elétrica armazenada é a mesma em qualquer uma destas ligações.

17. Calcule a energia armazenada na associação de capacitores indicada na figura, sabendo-se que:

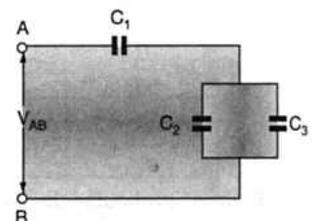
$$V_{AB} = 100 \text{ V};$$

$$C_1 = 2,5 \mu\text{F};$$

$$C_2 = 7,0 \mu\text{F};$$

$$C_3 = 3,0 \mu\text{F}.$$

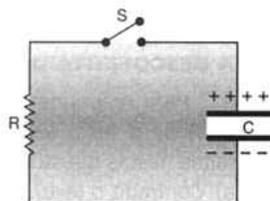
- a) $2,0 \times 10^{-4} \text{ J}$
 b) $4,6 \times 10^{-4} \text{ J}$
 c) $1,0 \times 10^{-2} \text{ J}$
 d) $2,3 \times 10^{-2} \text{ J}$
 e) $6,3 \times 10^{-2} \text{ J}$



Questão 17.

18. Carrega-se um capacitor, cuja capacitância é $C = 3,0 \mu\text{F}$, ligando-o a uma bateria de 200 V. Desliga-se a bateria e, em seguida, o capacitor é ligado a uma resistência $R = 200 \Omega$, como mostra a figura. Fechando-se a chave S, o capacitor começa a se descarregar através de R. Considerando a conservação da energia, podemos afirmar que a quantidade de calor que se dissipará em R, até que o capacitor se descarregue completamente, será de:

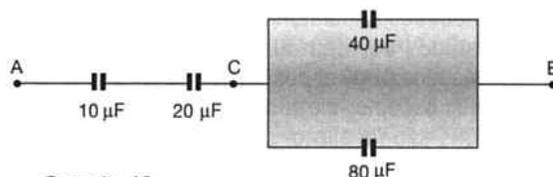
- a) $6,0 \times 10^{-2} \text{ J}$
- b) $3,0 \times 10^{-6} \text{ J}$
- c) $1,5 \times 10^{-4} \text{ J}$
- d) 200 cal
- e) 200 J



Questão 18.

19. Os pontos A e B do circuito desta questão são ligados aos pólos de uma bateria. Indique a afirmativa correta:

- a) A energia armazenada no capacitor de $10 \mu\text{F}$ é maior que no de $20 \mu\text{F}$.
- b) A energia armazenada entre A e C é menor que entre C e B.
- c) A carga no capacitor de $10 \mu\text{F}$ é maior que no de $20 \mu\text{F}$.
- d) A carga no capacitor de $40 \mu\text{F}$ é maior que no de $80 \mu\text{F}$.
- e) A energia armazenada no capacitor de $40 \mu\text{F}$ é maior que no de $80 \mu\text{F}$.



Questão 19.

QUESTÕES DE INTERPRETAÇÃO DE TEXTOS

As questões que serão apresentadas a seguir são baseadas em diversos textos selecionados em exames vestibulares de algumas universidades brasileiras. Elas são usadas, nesses exames, para testar a capacidade de interpretação de textos, à primeira vista. É muito comum o conteúdo de tais textos se referirem a aspectos interessantes e importantes da Física Moderna. Assim, resolvendo estas questões, você estará tendo a oportunidade de entrar em contato com novas idéias e aplicações da Física, que não foram abordadas no desenvolvimento regular de nosso livro.

As questões 1 e 2 referem-se ao seguinte texto:

“Em 1972, cada brasileiro consumia em média $3,0 \times 10^{10} \text{ J}$ de energia por ano. Ainda em 1972, 40% da energia consumida no Brasil era obtida do petróleo que se constitui em nossa principal fonte de energia.

O elevado preço do petróleo tornou necessária a pesquisa de fontes alternativas de energia, como, por exemplo, a energia solar.

O conteúdo de energia dos combustíveis fósseis (carvão, gás natural, petróleo etc.) é relevante quando comparado com o da energia solar direta: 1,0 L de petróleo contém $4,0 \times 10^7 \text{ J}$ de energia, enquanto a energia solar que incide, por dia, em cada metro quadrado da superfície da Terra é de $8,0 \times 10^6 \text{ J}$.

Estes dados permitem-nos concluir que seriam necessários 5 dias para que a energia solar incidente sobre cada metro quadrado da superfície da Terra se equiparasse à energia contida em apenas 1,0 L de petróleo.”

1. De acordo com o texto, do petróleo consumido no Brasil em 1972, cada pessoa utilizou, em média:
 - a) 100 L.
 - b) 250 L.
 - c) 300 L.
 - d) 750 L.
 - e) 1 500 L.
2. Tem-se um aquecedor solar que absorve toda a radiação incidente sobre ele e cuja área é de $4,0 \text{ m}^2$.

De acordo com o texto, a energia total que o aquecedor absorverá, se ficar exposto à radiação solar durante 1/4 do dia, será equivalente àquela contida em:

- a) 0,30 L de petróleo.
- b) 1,0 L de petróleo.
- c) 0,40 L de petróleo.
- d) 0,20 L de petróleo.
- e) 0,50 L de petróleo.

Para responder às questões de 3 a 5 leia com atenção o texto seguinte:

MICROSCOPIA MODERNA

Em seu curso de Física, você deve ter estudado os princípios gerais dos microscópios óticos. Sabe-se que os comprimentos de onda da luz visível estão compreendidos entre $4\ 000 \text{ \AA}$ ($1 \text{ angstrom} = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) e $7\ 000 \text{ \AA}$. Conseqüentemente, um microscópio ótico, usando a luz visível, não pode ser utilizado para examinar, com nitidez, objetos de dimensões inferiores a $4\ 000 \text{ \AA}$. A maioria das células vivas tem dimensões superiores a este valor e, portanto, o microscópio ótico é útil para estudá-las. Entretanto, existem muitas estruturas biológicas que são menores do que $4\ 000 \text{ \AA}$, como as moléculas complexas que formam a matéria viva.

Uma maneira de melhorar o poder de aumento do microscópio ótico consiste em iluminar o objeto a ser estudado com radiação ultravioleta e usar lentes que não absorvam esta radiação (o vidro comum a absorve). A imagem é, então, fotografada com filme sensível a esta radiação ou pode ser vista sobre uma tela fluorescente. Nestas condições, objetos de dimensões até 1 000 Å podem ser examinados. Entretanto, este valor é ainda muito superior às dimensões das maiores moléculas conhecidas.

A invenção de um aparelho, de características bem diferentes do microscópio ótico, baseado nas propriedades ondulatórias do elétron, tornou possível o estudo de estruturas que não podiam ser examinadas através dos microscópios óticos. Trata-se do microscópio eletrônico, no qual os feixes de elétrons são focalizados por dispositivos magnéticos ou eletrostáticos, que funcionam como uma espécie de lente.

O poder de resolução destes microscópios é dado através da fórmula:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

que fornece o comprimento de onda, λ , dos elétrons do feixe, onde h é a constante de Planck, m e e são, respectivamente, a massa e a carga dos elétrons e V é a diferença de potencial que os acelera, no microscópio. Com estes microscópios, foi possível chegar ao estudo de estruturas inferiores até a 1 Å e muitos trabalhos importantes foram feitos, como a compreensão do mecanismo de fotossíntese, a descoberta da constituição das membranas celulares (uma camada de gordura situada entre duas camadas de proteínas) etc.

3. Das afirmações que se seguem, aquela que não contradiz o texto é:
- O microscópio ótico permite-nos examinar a maioria das moléculas existentes nos organismos vivos.
 - Em um microscópio que utiliza a luz ultravioleta, a lente pode ser de vidro comum.
 - O microscópio eletrônico é baseado nas leis da ótica geométrica.
 - A maioria das estruturas moleculares foi descoberta após a invenção do microscópio eletrônico.
 - A invenção do microscópio eletrônico não possibilitou progressos no campo da biologia.
4. Todas as afirmações que se seguem são confirmadas pelo texto, exceto:
- A imagem fornecida por um microscópio eletrônico não pode ser observada diretamente pelo olho.
 - Se for possível usar radiações e lentes apropriadas, o poder de aumento de um microscópio ótico pode ser ampliado.

- O poder de resolução de um microscópio eletrônico seria alterado se utilizássemos um feixe de prótons em lugar de um feixe de elétrons.
 - O poder de resolução de um microscópio ótico não depende do comprimento de onda da luz utilizada.
5. Se em um microscópio eletrônico for aplicada uma voltagem de 100 V, o comprimento de onda, associado aos elétrons, ($h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ e $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) é mais próximo de:

- $10^{-7} \mu\text{m}$
- 10^{-10} Å
- 10^{14} Å
- 1 Å
- 10^{-7} m

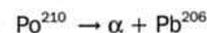
A DESCOBERTA DO NEUTRINO

Para responder às questões de 6 a 10 leia com atenção o texto seguinte e classifique as afirmativas feitas nestas questões de acordo com o código:

- Contradiz o texto.
- Não é assunto tratado no texto.
- É a idéia central do texto.
- É uma interpretação correta de um assunto tratado no texto.
- Não pode ser classificada em nenhuma das alternativas anteriores.

Você já deve saber que uma substância radioativa, ao se desintegrar, pode emitir radiações α (núcleos atômicos do hélio), β (elétrons) e γ (radiação eletromagnética).

Na desintegração α de um dado tipo de núcleo, todas as partículas α são emitidas com a mesma energia. Por exemplo, o núcleo de Po^{210} (polônio) emite uma partícula α de energia 5,30 MeV (1 MeV é uma unidade de energia igual a $1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$), transformando-se em Pb^{206} (chumbo).



Nesta transformação, o princípio da conservação da energia é obedecido e o excesso de massa do Po^{210} , em relação à massa final total (massa do Pb^{206} + massa da partícula α), é todo transformado em energia cinética, de acordo com a relação relativística $E = mc^2$, em que m é a massa da partícula e c é a velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Além deste princípio de conservação, outros princípios de conservação da Física Clássica (conservação da quantidade de movimento, conservação do momento angular etc.) são obedecidos na desintegração α .

Na desintegração β , como, por exemplo, a do In^{116} (índio), que se transforma em Sn^{116} (estanho), pela emissão da partícula β , verifica-se que os elétrons não são emitidos sempre com a mesma energia. Por exemplo, observando a desintegração de 1 000 átomos de In, obter-se-á, em geral, 1 000 elétrons de energias diferentes. As energias destes elétrons distribuem-se desde o valor zero, até um valor máximo, $E_{\text{máx}}$. Parece haver uma violação da conservação da energia. Para que houvesse conservação da energia, como acontece

na desintegração α , todos os elétrons deveriam ser emitidos com a mesma energia, igual ao valor $E_{m\grave{a}x}$, citado. Além disso, outros princípios de conservação também parecem ser violados nesta desintegração.

Em 1930, os físicos ficaram intrigados com esta observação. Tinham bastante confiança nas leis da conservação e esta era a primeira experiência que parecia estar em desacordo frontal com essas leis.

Refizeram a experiência várias vezes, com grande cuidado, para ver se não havia emissão de alguma outra radiação juntamente com o elétron, por exemplo, uma radiação γ . O resultado foi negativo; só o elétron era detectado.

Apesar disso, para "salvar" as leis da conservação, Pauli, e depois Fermi, postularam a existência de uma partícula muito especial, que denominaram "neutrino", que seria emitida simultaneamente com o elétron e que teria escapado à detecção. Esta partícula não poderia ser um fóton, nem possuir carga elétrica, sua massa seria nula, mas ela transportaria a energia cinética que faltava na desintegração β .

Só em 1956 foi construído um detector especial, com o qual os físicos puderam constatar a presença dos neutrinos, mas, mesmo antes, os físicos tinham fé na sua existência.

Desde a descoberta do neutrino, muitas outras partículas foram encontradas utilizando a mesma técnica: verificar se, em uma reação nuclear, há violação das leis da conservação e, em caso afirmativo, procurar uma partícula não detectada que explique a aparente violação.

6. O fato de nunca se ter observado, nos fenômenos físicos, uma violação das leis de conservação faz com que elas sejam uma arma poderosa para os cientistas, que lançam mão dela com confiança.
7. As radiações nucleares α , β e γ foram descobertas pela aplicação do princípio da conservação da energia às transformações em que elas apareceram.
8. Em certas desintegrações β , o princípio da conservação da energia é violado.
9. Na desintegração de Po^{210} , o núcleo de Pb^{206} sofre um recuo na mesma direção e em sentido contrário ao movimento da partícula α , pois a quantidade de movimento linear também se conserva.
10. Os físicos não suspeitavam da existência do neutrino quando ele foi detectado.

Para responder às questões **11** e **12**, leia, com atenção, o texto seguinte.

O CARBONO-14 E A IDADE DOS MATERIAIS

Um vestígio de radioatividade no carbono natural torna possível avaliar a idade de materiais que, em certa época, possuíam vida. A radioatividade do

carbono é devida à presença de uma pequena quantidade do isótopo ${}^6_6\text{C}^{14}$, que é instável. Este isótopo é produzido, principalmente, na atmosfera superior pela transformação (induzida por raios cósmicos) do isótopo estável ${}^6_6\text{C}^{13}$ em ${}^6_6\text{C}^{14}$. A taxa de produção do ${}^6_6\text{C}^{14}$ a partir do ${}^6_6\text{C}^{13}$ é igual à taxa de desintegração β que transforma o ${}^6_6\text{C}^{14}$ em ${}^7_7\text{N}^{14}$, de modo que a fração do carbono total da atmosfera constituída de ${}^6_6\text{C}^{14}$ é praticamente constante.

Quando o bióxido de carbono é usado pelas plantas, na fotossíntese, as células em crescimento incorporam os isótopos do carbono na mesma proporção em que eles existem na atmosfera. A atividade do carbono, neste momento, é de 15,3 emissões β por minuto, por grama de carbono. Quando se interrompe a interação com a atmosfera, como, por exemplo, quando um ramo é arrancado da árvore viva, a sua radioatividade começa a decrescer com uma taxa característica do ${}^6_6\text{C}^{14}$.

Se a atividade for medida algum tempo mais tarde e se a meia-vida do ${}^6_6\text{C}^{14}$ for conhecida, pode-se determinar o tempo decorrido desde o instante em que o ramo foi arrancado da árvore até o momento em que se mediu a atividade. A meia-vida de uma substância radioativa representa o tempo necessário para que metade dos átomos de uma amostra dessa substância se desintegre, isto é, para que o número de átomos radioativos da substância se reduza à metade.

11. Baseados nas informações fornecidas pelo texto, podemos afirmar que:
 - a) A atividade do ${}^6_6\text{C}^{14}$, em um ramo de árvore, passa a decrescer a partir do instante em que a planta não incorpora novos átomos deste isótopo em sua estrutura.
 - b) Os raios cósmicos são constituídos de elétrons, que se originam na desintegração β do ${}^6_6\text{C}^{14}$, nas camadas superiores da atmosfera.
 - c) O ${}^6_6\text{C}^{14}$ na atmosfera é estável, só se desintegrando a partir do instante em que é incorporado a uma planta.
 - d) Podemos, hoje, determinar a idade de qualquer objeto na superfície da Terra, como uma rocha, por exemplo, desde que o objeto contenha uma certa quantidade de ${}^6_6\text{C}^{14}$.
 - e) A quantidade de ${}^6_6\text{C}^{14}$ na atmosfera está aumentando gradualmente, em virtude da transformação de ${}^6_6\text{C}^{13}$ em ${}^6_6\text{C}^{14}$.

12. Medindo-se a atividade do carbono no cabo de madeira de uma arma primitiva, encontrou-se que ela era de 7,5 emissões β por minuto por grama de carbono. Sabendo que a meia-vida do ${}^6_6\text{C}^{14}$ é de, aproximadamente, 6 000 anos, podemos concluir que a idade da arma deve ser, aproximadamente, de:

- a) 1 500 anos.
- b) 3 000 anos.
- c) 6 000 anos.
- d) 12 000 anos.
- e) 18 000 anos.

Para responder às questões **13** a **15**, leia com atenção o texto seguinte:

EFEITO FOTOELÉTRICO

Com relação ao efeito fotoelétrico são observados experimentalmente os seguintes fatos:

Quando a luz incide sobre a superfície de um metal, elétrons podem ser emitidos por ela.

Quando luz de certa frequência arranca elétrons do metal, eles não saem todos com a mesma energia. Suas energias distribuem-se entre um valor mínimo e um máximo.

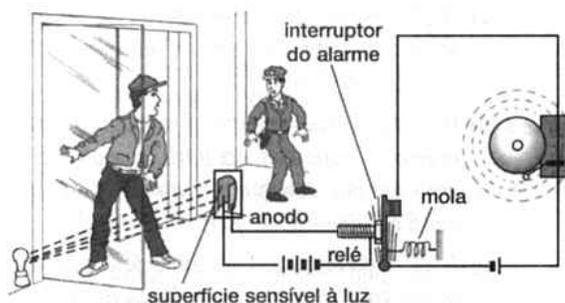
É necessária uma energia mínima, chamada função trabalho W , para arrancar um elétron de determinado metal.

Para explicar o efeito fotoelétrico são necessárias as seguintes suposições:

- A luz é absorvida em quantidades descontínuas, chamadas fótons. Cada fóton tem uma energia hf , em que h é uma constante de valor $6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ e f é a frequência da luz.
- A intensidade de um feixe de luz de uma dada frequência que atinge a superfície do metal é proporcional ao número de fótons que chegam à superfície, por segundo.
- Toda a energia de um fóton é absorvida por um único elétron.

(Uma unidade conveniente para a medida da energia dos elétrons é o elétron-volt, que corresponde à energia que um elétron adquire quando acelerado através de uma diferença de potencial de 1 volt.

A carga de um elétron é $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.)



Um tipo de alarme contra ladrão tem seu funcionamento baseado em um relé fotoelétrico. Um feixe de luz, ao atingir uma superfície sensível (fotoemissor), faz com que ela emita elétrons, que são atraídos para o anodo. Assim, o circuito do relé se fecha e o interruptor do alarme permanece desligado (o eletroímã do relé está acionado). Quando o feixe de luz é interrompido (pelo ladrão), a corrente deixa de circular no relé e o circuito da campainha é fechado por ação da mola ilustrada na figura.

13. Indique a afirmativa *errada*:

- a) $h = 4,134 \times 10^{-15}$ elétron-volt \times segundo
- b) 1 elétron-volt = $1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- c) Quando se faz um gráfico da energia de um fóton em função da sua frequência, obtém-se uma reta.
- d) Um fóton de luz azul tem maior energia que um fóton de luz vermelha.
- e) A intensidade de um feixe de luz só depende de sua frequência.

14. Indique a afirmativa *correta*:

- a) Qualquer que seja a frequência da luz incidente, é possível que sejam arrancados elétrons de um metal.
- b) Os elétrons no interior do metal têm todos a mesma energia.
- c) Quando elétrons são arrancados do metal, quanto maior a frequência da luz incidente, maiores são as energias com que os elétrons abandonam o metal.
- d) Quanto maior for a intensidade da luz de uma dada frequência que incide sobre a superfície, maiores são as energias com que os elétrons abandonam.
- e) Quanto maior a energia de um fóton, maior o número de elétrons que ele pode arrancar do metal.

15. A função trabalho do sódio é 2,3 elétron-volt. Se ele é iluminado com luz de frequência $1,0 \times 10^{15}$ hertz, a energia máxima dos elétrons será:

- a) $4,3 \times 10^{-19} \text{ J}$
- b) 1,8 elétron-volts
- c) 6,4 elétron-volts
- d) $6,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- e) $8,9 \times 10^{-19} \text{ J}$

Para responder às questões **16** a **18**, leia com atenção o seguinte texto:

ANTIMATÉRIA

A matéria ordinária, como a que se encontra no sistema solar, por exemplo, é toda constituída de átomos cujos núcleos são compostos de prótons e nêutrons, circundados por elétrons.

Entretanto, raciocinando por meio do princípio de simetria, que, de um modo geral, é sempre observado nos fenômenos naturais, os cientistas supõem que devam existir regiões do Universo, provavelmente em nossa própria galáxia, nas quais a matéria presente seja constituída de "antipartículas". Este nome é dado a partículas elementares com propriedades simétricas às das partículas elementares nossas conhecidas. Assim, o antielétron seria o "pósitron", partícula de mesma massa que o elétron e de carga de mesmo valor, porém positiva. A existência desta partícula já foi constatada experimentalmente pelos físicos em certos tipos de desintegração. O "antipróton", partícula semelhante ao próton, porém de carga negativa, tam-

bém já teve sua existência comprovada pela experiência. Teorias sofisticadas mostram que todas as partículas elementares têm suas antipartículas (com exceção do fóton e do méson π neutro) sendo, entretanto, difícil a constatação de sua presença, devido ao fenômeno da "aniquilação". Quando uma partícula encontra sua antipartícula (o pósitron com o elétron, por exemplo), elas se "aniquilam", isto é, desaparecem ambas, dando origem ao aparecimento de uma quantidade de energia equivalente à massa desaparecida, de acordo com a equação de Einstein: $E = mc^2$, em que m é a massa desaparecida, c é a velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s) e E é a energia equivalente à massa m .

A matéria constituída de antipartículas é designada por "antimatéria". Seus átomos teriam núcleos negativos, formados por antiprótons e antinêutrons rodeados de pósitrons.

Especulações em torno deste assunto levam à suposição da existência de certas galáxias constituídas de antimatéria, mas tão cedo não teremos evidências suficientes para confirmar estas hipóteses. No encontro de uma tal galáxia com outra constituída de matéria ordinária, haveria o aniquilamento total da matéria, com um desprendimento descomunal de energia, milhares de vezes superior à de uma bomba de hidrogênio.

Por outro lado, já vêm sendo testadas experiências para obtenção de partículas (a partícula normal e sua antipartícula) a partir de uma enorme concentração de energia. Este processo só se tornou possível recentemente, com a construção de aceleradores de partículas de altíssimas potências. Supõe-se que por ocasião do Big-Bang este processo tenha ocorrido espontaneamente, dando origem ao Universo.

16. O hélio é um elemento cujo átomo tem núcleo constituído de 2 prótons e 2 nêutrons, rodeado de elétrons. O anti-hélio seria um átomo constituído por:
- Núcleo de pósitron rodeado de antiprótons e antinêutrons.
 - Núcleo de antiprótons e nêutrons rodeado de elétrons.
 - Núcleo de antiprótons e nêutrons rodeado de antielétrons.
 - Núcleo de antiprótons e antinêutrons rodeado de pósitrons.
 - Núcleo de elétrons rodeado de prótons e nêutrons.
17. Se um rapaz normal (massa de 60 kg), em uma viagem sideral, encontrasse uma "antimoça" (constituída de 60 kg de antimatéria), a energia originada pela sua "aniquilação":
- Não poderia ser calculada sem que se conhecessem características (a temperatura, pressão, posição etc.) da região do espaço em que se deu o encontro.

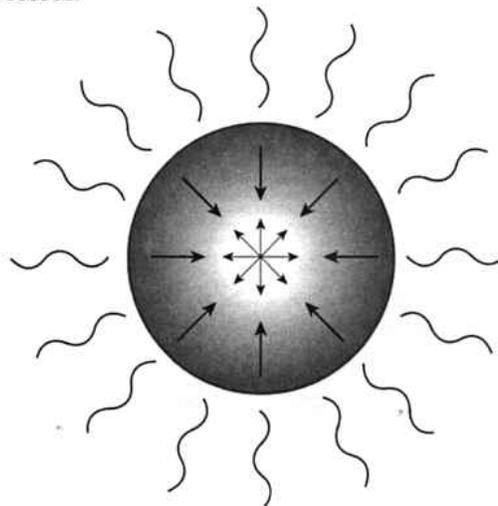
- Dependeria dos tipos das partículas e respectivas antipartículas constituintes dos dois entes.
 - Seria da ordem de 10^4 milhões de J.
 - Seria da ordem de 10^4 milhões de kWh.
 - Não estaria relacionada corretamente com nenhuma das alternativas anteriores.
18. Do texto podemos concluir, exceto:
- Nem todas as antipartículas tiveram sua existência comprovada experimentalmente.
 - O fenômeno da aniquilação contraria o princípio da conservação da matéria (lei de Lavoisier).
 - É possível existir, no interior da Terra, alguma região constituída de antimatéria.
 - O princípio da conservação da energia só é verificado no fenômeno de aniquilação supondo a matéria equivalente à energia.
 - O encontro de nossa galáxia com outra, constituída de antimatéria, seria caótico.

Para responder às questões 19 e 20, leia com atenção o seguinte texto:

BURACO NEGRO

Em qualquer estrela, como o Sol, por exemplo, ocorrem sempre dois processos importantes que vão determinar o seu tamanho. Um desses processos é a atração gravitacional entre as próprias partículas constituintes da estrela, que tende a juntá-las em seu centro, o que levaria à redução de suas dimensões. O outro processo são as reações que ocorrem entre os núcleos dos átomos ali presentes. Estas reações são semelhantes àquelas que ocorreriam em várias bombas de hidrogênio, tendendo a explodir a estrela, o que levaria ao aumento de suas dimensões.

A figura abaixo é um modelo destes dois processos: as setas para dentro ilustram o processo gravitacional e as setas para fora representam o efeito das explosões nucleares. O tamanho da estrela se estabiliza quando ocorre o equilíbrio entre estes dois processos.



Para o caso do Sol, os pesquisadores em Astrofísica concluíram que no futuro haverá uma predominância das explosões atômicas, de modo que ele irá se expandir, transformando-se em um tipo de estrela conhecido como gigante vermelha. O Sol ficará tão grande que suas dimensões se estenderão além da órbita da Terra e, assim, nosso planeta será "engolido" por ele. Felizmente, isso só ocorrerá daqui, aproximadamente, a 5 bilhões de anos!...

Quando todo o combustível atômico do Sol tiver se esgotado, a gigante vermelha, sob ação apenas do processo gravitacional, terá suas dimensões drasticamente reduzidas. O Sol se transformará, então, em uma pequena estrela denominada anã branca, até alcançar um último estágio, no qual não emite nenhuma radiação, podendo ser chamada de anã negra.

Em estrelas que possuem massa superior a cerca de quatro vezes a massa do Sol, as forças gravitacionais entre suas partículas são muito grandes. Nestas estrelas, o processo de redução das dimensões é muito mais drástico, levando seus átomos a estarem praticamente unidos, sem espaço vazio entre eles!... Em tal estado, a matéria está tão densa (comprimida), que a força gravitacional que ela exerce em sua superfície torna-se enorme: nada, nem a própria luz, consegue escapar desta ação gravitacional. Uma estrela que sofreu este processo é denominada "buraco negro".

Para o Sol tornar-se um buraco negro, seu diâmetro teria que ser reduzido a apenas 6 km (isto, como vimos, não irá ocorrer com o Sol). A Terra só poderia se transformar em um buraco negro se toda sua massa fosse concentrada em uma esferinha de 2 cm de diâmetro!

Uma pessoa que se aproximasse de um buraco negro (isto só poderá acontecer com o desenvolvimento da astronáutica) seria "engolida" por ele.

Portanto, muito cuidado! Não se aproxime de um buraco negro!

19. Entre as afirmações seguintes assinale aquela que é confirmada pelo texto:

- O Sol, *atualmente*, atingiu uma fase de equilíbrio, apresentando um tamanho definitivo, cujas dimensões permanecerão invariáveis.
- O Sol é um exemplo de estrela que futuramente transformar-se-á em um buraco negro.
- Ao se expandir, o Sol poderá, futuramente, ultrapassar dimensões tais que a Terra será incorporada a ele e desaparecerá.
- No núcleo do Sol ocorrem reações nucleares que transformam a matéria em energia e assim ele nunca se resfriará.
- A gravitação manifestada atualmente pela massa solar vem provocando redução em suas dimensões.

20. Em relação aos buracos negros o texto nos permite concluir, exceto:

- Para uma estrela se transformar em buraco negro, é necessário que sua massa seja superior a cerca de quatro vezes a massa solar.
- Os enormes valores das forças gravitacionais que são exercidas nas proximidades dos buracos negros são devidos à extraordinária densidade da matéria que os constitui.
- O valor do campo gravitacional produzido por um buraco negro é tão grande que as próprias radiações luminosas que ele poderia emitir não podem escapar de sua superfície.
- Para que a Terra pudesse se transformar em um buraco negro, toda sua massa deveria se concentrar em uma pequena esfera, menor do que uma bola de pingue-pongue.
- Todos os corpos celestes, em futuro remoto, se transformarão em buracos negros.

Respostas

dos exercícios

CAPÍTULO 17 - Carga elétrica

Exercícios de Fixação

- Quando dois corpos, feitos de uma mesma substância, são atritados, não há transferência de elétrons de um para outro e, portanto, eles não se eletrizam.
- a) sim
b) positiva
c) a borracha
d) a lã
- igual
- a) carga positiva do marfim e carga negativa no papel
b) o marfim
- a) Repelir.
b) Atrair.
- A barra perde sua carga para a Terra através do corpo da pessoa.
- a) Sim; os pneus (isolantes) impedem que o ônibus perca sua carga para a Terra.
b) O ônibus perde sua carga para a Terra através do corpo da pessoa e isto provoca o "choque elétrico".
c) Como nosso clima é geralmente úmido, o ônibus não chega a adquirir carga elétrica apreciável.
- A corrente, sendo condutora, estabelece contato com a Terra, impedindo que o caminhão adquira carga elétrica considerável (que poderia provocar a centelha).
- O ar úmido conduz para a Terra a carga elétrica que se forma por atrito (evitando a formação de centelhas).
- a) para a extremidade B
b) positiva em A e negativa em B
c) indução eletrostática
- a) não
b) Há alinhamento das moléculas de maneira semelhante à fig. 17-14-b, porém com as cargas orientadas de maneira inversa.
c) positiva em A e negativa em B
d) polarização do dielétrico
- a) Os elétrons do corpo metálico se deslocam para a Terra, através do fio condutor.
b) sim, positiva
- a) Seriam transferidos para a Terra.
b) Ficaria neutro.
- a) carga positiva na extremidade mais próxima de B e carga negativa na extremidade mais afastada
b) A extremidade mais próxima de B será atraída e a mais afastada será repelida.
c) Sim, porque a força de atração é maior do que a de repulsão.
- A carga positiva de C é neutralizada por parte da carga de B; então C é repelido por B, pois ambos estão, agora, com carga negativa.
- a) Não, porque ela também seria atraída se estivesse neutra.
b) sim
- a) positiva na esfera e negativa nas folhas
b) sim
c) Elétrons de C serão transferidos para a esfera, neutralizando sua carga positiva.
d) negativa
- a) Negativa, porque o bastão repele elétrons para as folhas.
b) Diminuiria, porque B atrairia elétrons livres para a esfera e a carga nas folhas diminuiria.
- a) $1,6 \times 10^{-19}$ C
b) $Q = 8,0 \times 10^{-5}$ C = 80 μ C
c) muito maior! ($2 \times 10^9 = 2$ bilhões de elétrons em excesso)
- a) para a direita e igual a 0,86 N
b) para a esquerda e igual a 0,86 N
- a) multiplicado por 5
b) 4,3 N
- a) Ficará 25 vezes menor.
b) Ficará 4 vezes maior.
- a) Ficará 43 vezes menor.
b) $2,0 \times 10^{-2}$ N
- a) O âmbar atritado atrai qualquer corpo, enquanto o ímã só atrai pedaços de ferro.
b) Os fenômenos elétricos e os magnéticos são de naturezas diferentes.
- a) Qualquer substância pode ser eletrizada (não apenas o âmbar).
b) a repulsão
- a) Existem condutores e isolantes de eletricidade.
b) Existem dois tipos de eletricidade: "vítrea" e "resinosa".
- Veja a figura.



Resposta do exercício 26.

27. a) teoria do fluido único
b) vítrea → positiva
resinosa → negativa
c) Pelo atrito um corpo perde fluido elétrico e o outro recebe este fluido.
28. a conservação da carga elétrica
29. a) teoria dos dois fluidos
b) teoria do fluido único
30. por analogia com a força de atração gravitacional
31. na experiência de Cavendish
32. a) não
b) sim

Problemas e Testes

1. a) 63,5 g
b) $1,2 \times 10^{24}$ átomos
c) $1,2 \times 10^{24}$ elétrons livres
2. (e)
3. negativo
4. a) Elétrons livres se deslocam para as extremidades dos blocos A e C, próximas dos bastões.
b) A negativo, B positivo e C negativo
5. (c)
6. a) $N \cdot m^2/C^2$
b) $9 \times 10^9 N$
c) 9×10^5 toneladas (novecentas mil toneladas)
7. a) 3 vezes
b) Diminuiu 9 vezes.
c) $3,0 \times 10^{-4} N$
8. a) Reduzida de 5 vezes.
b) 3,0 cm
9. (b)
10. (d)
11. (e)
12. a) 0,10 N
b) $0,33 \mu C$
c) $2,1 \times 10^{12}$ elétrons
13. \vec{F}_3
14. a) 0,18 N para a direita
b) 1,08 N para a esquerda
c) 0,90 N para a esquerda
15. 1,8 N para a direita
16. a) Tornar-se-á 81 vezes menor.
b) Diminuída de 9 vezes.
17. a) $2,5 \times 10^{-9} N$
b) Torna-se 81 vezes menor.
c) Porque as forças de ligação entre os íons tornam-se muito pequenas quando o sal é colocado na água.
18. $Q = m\sqrt{G/k_0}$

19. $81 m/s^2$, ao longo da diagonal que une Q_2 a q e no sentido de Q_2 para q .
20. $1,6 \times 10^{-7} C$
21. $2,2 \times 10^6 m/s$
22. a) Diminui.
b) Aumenta.
23. a) Veja a figura.
b) Será atraída pela extremidade de B e, a seguir, repelida.



Resposta do problema 23-a.

24. a) $10^{-8} N$
b) $10^{-47} N$
c) A força elétrica é 10^{39} vezes maior!
25. Bi^{210} tem carga positiva maior, a diferença sendo igual à carga do próton.
26. Por simetria, a esfera de alumínio recebe metade da carga da esfera de cobre; as esferas de isopor e de borracha podem receber pequena carga apenas no ponto de contato.
27. no 1º caso
28. a) sim
b) sim
c) não
29. $2,4 \times 10^{-3} N$
30. não
31. Diminui.

Problemas Suplementares

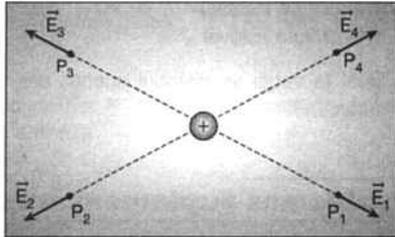
1. $1,7 \times 10^{11} C$
2. quatro vezes maior
3. na glicerina
4. $1,2 \times 10^{-5} C$ e $3,8 \times 10^{-5} C$
5. a) 510 N
b) $7,6 \times 10^{28} m/s^2$
6. a uma distância de 5,0 cm da carga A
7. $Q = 0,87 \mu C$
8. $q = Q$ ou $q = 0,87 \mu C$
9. $d = 59 cm$
10. $\omega = 3,0 rad/s$
11. a) $2,0 \mu C$
b) Repelindo-se.
c) 15 vezes
12. a) Ambas são negativas.
b) $q_1 = q_3 = -6,0 \mu C$
13. Cada esfera deve receber uma carga $Q/2$.

CAPÍTULO 18 - Campo elétrico

Exercícios de Fixação

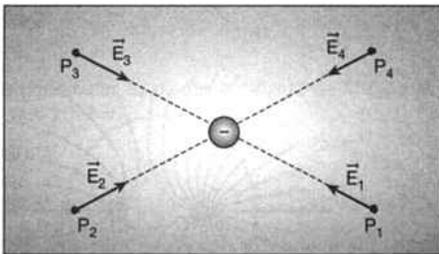
- Porque atuará uma força elétrica em q .
 - Q
 - carga de prova
 - sim

- Veja a figura.



Resposta do exercício 2.

- Veja a figura.



Resposta do exercício 3.

- $4,0 \times 10^5$ N/C
 - vertical para baixo
- negativa
 - $4,0 \mu\text{C}$
- $4,5 \times 10^5$ N/C
 - 2 vezes maior
 - $9,0 \times 10^5$ N/C
- 3 vezes maior
 - 9 vezes menor
 - $1,0 \times 10^5$ N/C
- 80 vezes menor
 - $1,1 \times 10^4$ N/C
- para a direita
 - $7,2 \times 10^5$ N/C
- para a direita
 - $7,2 \times 10^5$ N/C
 - $1,44 \times 10^6$ N/C
- negativa
 - 2 vezes menor
 - 4 vezes maior
 - $6,0 \times 10^4$ N/C
- vetores tangentes às linhas de força em P_1 e P_2
 - $E_1 > E_2$ porque em P_2 as linhas estão mais separadas.
- Não, pois esta expressão só é válida para calcular o campo criado por uma carga puntual.
 - Sim, esta expressão é válida em qualquer situação.
- da placa positiva para a negativa
 - Igual, porque o módulo da carga do próton é igual ao do elétron.
 - Permaneceria constante.
 - retilíneo uniformemente acelerado
- Menor, porque sua massa é maior.
 - maior
- O feixe A é constituído de elétrons, o feixe B de nêutrons e o feixe C de prótons.
 - Porque o elétron, tendo menor massa, adquire maior aceleração ao penetrar no campo.
- Não, porque a borracha é isolante.
- Eletrizar-se-á positivamente.
 - Não, porque não há carga elétrica na superfície interna do recipiente.
- Não, porque o campo elétrico é nulo no interior de uma cavidade metálica.
 - Ângulo de 90° , porque o vetor \vec{E} é perpendicular à superfície do condutor.
- Porque ela se eletriza em contato com a superfície externa da gaiola.
 - Por causa da blindagem eletrostática produzida pela gaiola.
- Deveria ter envolvido P com a cúpula metálica.
- Quando é aplicado a ele um campo elétrico suficiente para tornar livres alguns elétrons dos átomos de sua estrutura.
 - É o maior valor do campo elétrico que pode ser aplicado ao isolante sem que ele se torne um condutor.
- A mica possui rigidez dielétrica elevada.
 - não
- Escoa para o ar.
 - É superior à rigidez dielétrica do ar.
- A rigidez dielétrica do ar diminui quando aumenta a umidade do ar.
 - É maior do que a do ar.
- um bilhão de vezes maior
 - Não, a intensidade do campo (rigidez dielétrica) é praticamente a mesma em ambas as regiões.
- pela ponta A
 - maior
- É grande a probabilidade de um raio atingir uma árvore (ela se comporta como uma ponta).
- apenas a pessoa a 80 m da torre
- Não; o monumento mostrado na figura (alto e pontiagudo) já foi atingido inúmeras vezes por raios, durante tempestades.



Resposta do exercício 30.

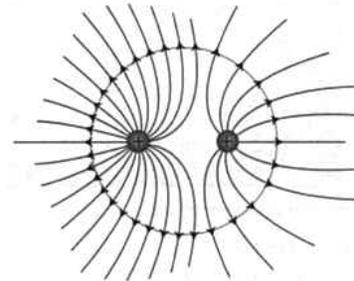
Problemas e Testes

1. a) $9,1 \times 10^{-30}$ N
b) vertical, para baixo
c) $5,7 \times 10^{-11}$ N/C
2. (d)
3. (e)
4. (c)
5. a) zero
b) zero
c) $4,5 \times 10^5$ N/C
d) $2,0 \times 10^5$ N/C
6. a) negativo
b) 4×10^5 C
7. a) distribuída na superfície terrestre
b) 10^{-3} $\mu\text{C}/\text{m}^2$
8. a) negativa
b) $0,15$ μC
9. $3,3$ μC
10. (a)
11. a) $8,7 \times 10^{16}$ m/s²
b) $3,4 \times 10^{-10}$ s
12. a) em A, carga negativa e, em B, carga positiva
b) maior
c) \vec{F}_A para a esquerda e \vec{F}_B para a direita
d) Tenderá a se deslocar para a esquerda.
13. a) em A, positiva e, em B, negativa
b) igual
c) \vec{F}_A para a esquerda e \vec{F}_B para a direita
d) Permanecerá em repouso.
14. apenas três elétrons
15. a) Diminuirá.
b) Aumentará.
16. no ponto J
17. $1,9 \times 10^4$ N/C
18. Duas linhas de força de um mesmo campo elétrico não se cruzam.
19. a) $5,7 \times 10^{11}$ N/C
b) 190 000 vezes maior!
c) $9,1 \times 10^{-9}$ N
20. No segmento que une as cargas, a $5,0$ cm de distância da carga menor.
21. $E = 8,1 k_0 Q/L^2$
22. a) Q_1 é positiva e Q_2 é negativa.
b) maior
c) maior
23. apenas a aceleração; $a = 8,8 \times 10^{14}$ m/s²
24. b) $2,0 \times 10^{-9}$ s
c) $6,4$ mm

25. a) igual
b) menor
c) menor
26. a) maior para a figura (b)
b) semelhantes às de uma carga puntual de módulo $2Q$
27. Por toda a superfície da esfera (não há pontas).
28. a) equilíbrio estável
b) equilíbrio instável
29. a) equilíbrio instável
b) equilíbrio estável
30. Igual (a carga se distribui apenas nas superfícies das esferas).

Problemas Suplementares

1. $8,0 \times 10^3$ N/C
2. Veja a figura.



Resposta do problema suplementar 2.

3. $1,3 \times 10^3$ N/C
4. $E = E_0/8$
5. $Q_2 = 4Q_1$
6. a) $2,0 \times 10^{23}$ elétrons
b) $9,8 \times 10^{27}$ elétrons
c) 2×10^{-13} %!
7. a) $E = 0$
b) não ($E \neq 0$)
8. a) $E = 0$; concordando com a resposta do problema 7.
b) $x = \pm R\sqrt{2}/2$
9. b) sim
c) $T = 2\pi\sqrt{mR^3/k_0Qq}$
10. a) $4,0$ μC
b) não
11. $(\pi/2)$ s
12. a) não
b) Atinge a placa positiva a 10 cm do ponto de lançamento.

CAPÍTULO 19 - Potencial elétrico

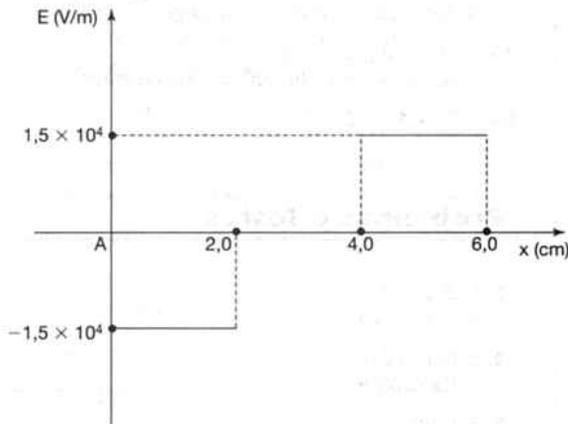
Exercícios de Fixação

- Significa que 1,5 J de energia são transferidos a cada 1 C que se desloca de um pólo ao outro.
- a) 220 V
b) 5,0 C
- a) igual
b) $-1,5 \times 10^{-3}$ J
c) zero
- a) perpendicular à trajetória, no sentido da esquerda para a direita
b) $T_{AB} = 0$
c) $V_A - V_B = 0$
- a) para A
b) Menor, porque uma carga positiva tende sempre a se deslocar para regiões onde o potencial é menor.
- a) para B
b) maior
c) sim
- a) Perpendicular às placas e dirigido de M para N.
b) $6,0 \times 10^3$ N/C
- a) 750 V
b) zero
c) 750 V
- a) Não, pois esta expressão só poderia ser usada se o campo fosse uniforme.
b) Sim, esta expressão é válida em qualquer situação.
- a) Reta passando pela origem, pois $V_{AB} \propto d$
b) a intensidade do campo
- a) 50 V/mm
b) $5,0 \times 10^4$ V/m = $5,0 \times 10^4$ N/C
- a) $V_A - V_C = 40$ V e $V_B - V_C = 70$ V
b) $V_C = 0$, $V_A = 40$ V e $V_B = 70$ V
c) $V_p = -80$ V
- Tanto com o nível em P quanto em C, obteremos $V_B - V_A = 30$ V.
- a) sim
b) não
- a) duas vezes menor
b) V torna-se três vezes menor.
c) hipérbole
- a) $V_A = -18 \times 10^4$ V
b) $V_B = -6,0 \times 10^4$ V
c) $V_{BA} = 12 \times 10^4$ V
- a) $V_1 = 9,0 \times 10^5$ V
b) $V_2 = -3,0 \times 10^5$ V
c) $V = 6,0 \times 10^5$ V
- a) nulo
b) diferente de zero
c) nula
- a) $V_c = 4,5 \times 10^4$ V
b) $V_p = V_r = 4,5 \times 10^4$ V
- a) de S_1 para S_2
b) linhas perpendiculares a S_1 e S_2 e dirigidas de S_1 para S_2
c) $V_{AB} = 0$ e $V_{AC} = 200$ V
- a) $V_B = 800$ V
b) $V_C = 800$ V
c) $T_{AB} = 0$
- $Q_1 = Q_2 = 3,0$ μ C
- a) $V_1 = 8,1 \times 10^4$ V e $V_2 = 3,6 \times 10^4$ V
b) da esfera 2 para a esfera 1
- a) A carga da esfera 1 diminui e a da esfera 2 aumenta.
b) O potencial da esfera 1 diminui e o da esfera 2 aumenta.
- a) igual
b) $Q'_1 + Q'_2 = 3,0$ μ C
- $V_{AB} = 5 \times 10^7$ V (50 milhões de volts)
- a) igual a 1 μ C
b) menor do que 1 μ C
- a) 2×10^{-3} C
b) não
- a) 1,8 atm
b) 9 atm
- 40 s
- 500 W
- a) O valor da grandeza varia em "saltos".
b) $1,6 \times 10^{-19}$ C (módulo da carga do elétron)
- a) $m = 3,2 \times 10^{-15}$ kg
b) Aproximadamente 300 bilhões de gotas!
- $1,55 \times 10^{-19}$ C

Problemas e Testes

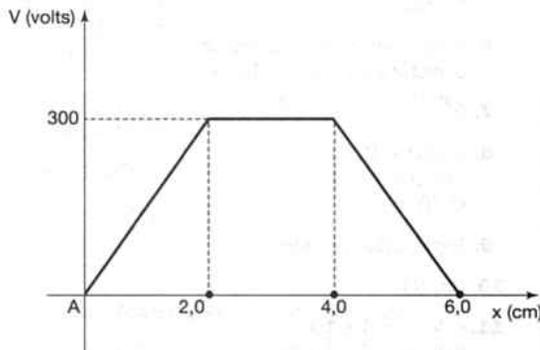
- a) $3,6 \times 10^3$ C
b) $4,32 \times 10^5$ J
- a) 0,12 kWh
b) R\$ 0,0096
- a) 0,50 J
b) $2,5 \times 10^5$ V
- a) menor
b) maior
- a) reta passando pela origem
b) distância entre as placas
- (d)
- a) $6,0 \times 10^{-4}$ J
b) $6,0 \times 10^{-4}$ J
c) 20 m/s
- Todas estão corretas.
- (a), (e)
- a) $V_A = 5,4 \times 10^5$ V
b) $V_B = 3,6 \times 10^5$ V
c) $V_{AB} = 1,8 \times 10^5$ V

12. (b)
 13. (a)
 14. (c)
 15. $Q_1 = 4,5 \mu\text{C}$ e $Q_2 = 1,5 \mu\text{C}$
 16. $E = 0$ nesta região
 17. a) 20 000 eV c) zero
 b) 20 000 eV d) 40 000 eV
 18. a) Aumentará. b) 1,2 mm
 19. a) $v = \sqrt{2qV_{pl}/m}$ b) 60 000 V
 20. as cargas positivas em vértices opostos e as cargas negativas também (por exemplo, cargas positivas em A e C e negativas em B e D)
 21. a) $2,4 \times 10^6 \text{ J}$ b) 12 km!
 22. $1,25 \times 10^{16}$ elétrons/s
 23. a) $3,3 \times 10^{10} \text{ m/s}^2$
 b) 8,0 keV ou $1,28 \times 10^{-15} \text{ J}$
 c) em virtude das colisões com os átomos do gás no tubo
 24. a) 35 dias b) 800 kg
 25. Não haverá passagem de carga.
 26. O potencial de cada esfera é igual a 14 V.
 27. a) Veja a figura.



Resposta do problema 27-a.

b) Veja a figura.

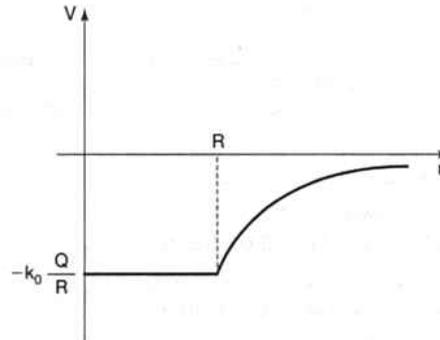


Resposta do problema 27-b.

28. a) $x = a/2$
 b) qualquer ponto de uma circunferência de centro A e raio $a/2$
 29. a) de B para A; $Q = +3,0 \mu\text{C}$ em cada esfera
 b) de B para A; $Q = +5,0 \mu\text{C}$ em cada esfera
 c) de A para B; $Q = -5,0 \mu\text{C}$ em cada esfera
 d) de A para B; $Q = -1,0 \mu\text{C}$ em cada esfera
 30. A partícula se detém (e volta) a uma distância $r = 4,5 \times 10^{-14} \text{ m}$ do centro do núcleo ($r = 9$ raios do núcleo do átomo de ouro).
 31. a) $E_p = 0,3 \text{ J}$
 b) Diminui.
 c) Sim, possui $E_c = 0,3 \text{ J}$.
 32. a) E_p diminui e E_c aumenta.
 b) $E_p = -10^{-18} \text{ J}$ e $E_c = 10^{-18} \text{ J}$

Problemas Suplementares

1. $2 \times 10^3 \text{ V}$
 2. 45 V
 3. $1,5 \times 10^6 \text{ V}$
 4. a) Diminui. b) Aumenta.
 5. a) crescentes
 b) O valor máximo de V é igual a zero em $r \rightarrow \infty$.
 c) Veja a figura.



Resposta do problema suplementar 5.

6. a) 0,18 J b) 0,12 J
 7. a) 6,0 m/s b) menor
 8. a) $V_A = k_0(Q_A/R_A) + k_0(Q_B/R_B)$
 b) $V_B = k_0(Q_A/R_B) + k_0(Q_B/R_B)$
 c) Q_A se transfere integralmente para B.
 d) o gerador de Van de Graaff
 9. cerca de 3°
 10. a) V_{AB} deve ser maior do que $9,3 \times 10^6 \text{ V}$
 b) $V_{AB} > 9,3 \times 10^6 \text{ V}$ (independe da carga e da massa da partícula).
 11. a) $1,5 \times 10^4 \text{ V}$ b) sim
 12. 5,0 J
 13. a) $dV/dx = -k_0Q/x^2$ b) $E(x) = -dV/dx$
 14. $E(x) = 2k_0Qd/x^3$
 15. $V(x) = -k_0Qx^2/2R^3$ (com nível no centro do anel)

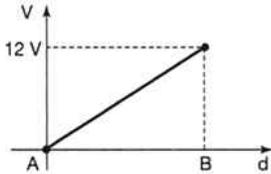
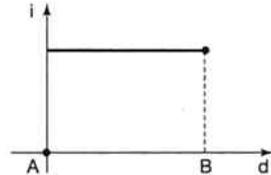
CAPÍTULO 20 - Corrente elétrica

Exercícios de Fixação

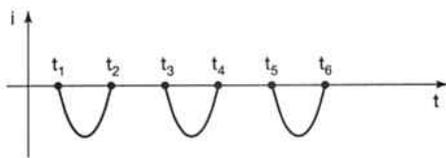
1. a) para a direita
b) para a esquerda
2. a) $\Delta Q = 32 \text{ C}$
b) $i = 3,2 \text{ A}$
3. a) 240 C
b) $1,5 \times 10^{21}$ elétrons
4. a) da esquerda para a direita
b) $4,0 \text{ A}$
5. a) 4 pilhas
b) de maneira semelhante à fig. 20-9-a
6. a) não
b) $V_{AB} = 3,0 \text{ V}$
7. a) $V_{BC} = 0$; $V_{DE} = 0$ e $V_{FG} = 0$
b) Aumenta 6 V .
c) Diminui 6 V .
8. a) $V_{AE} = 12 \text{ V}$
b) $V_{AV} = 12 \text{ V}$
9. a) de A para B
b) de C para D
c) do pólo negativo para o pólo positivo
10. a) $1,2 \text{ A}$
b) $1,2 \text{ A}$
c) $1,2 \text{ A}$
11. a) errada
b) certa
12. a) $3,0 \Omega$
b) $0,50 \text{ A}$
c) $4,5 \text{ V}$
13. a) AB, CD, EF
b) BC, DE
c) $V_{AB} = V_{CD} = V_{EF} = 0$
14. a) $0,30 \text{ A}$ em ambas
b) $V_{BC} = 4,5 \text{ V}$; $V_{DE} = 7,5 \text{ V}$
c) $V_{AD} = 4,5 \text{ V}$; $V_{AF} = 12 \text{ V}$
15. a) 4 vezes menor
b) $8,0 \text{ A}$
16. a) o cobre
b) a prata
17. a) $0,24 \text{ A}$
b) $0,12 \text{ A}$
18. a) sim
b) 40Ω
19. a) Também duplica.
b) Não se altera.
c) 80 V
20. a) não
b) 100Ω
c) 75Ω
21. a) igual
b) maior
c) 12 V
22. a) 6 V em ambas
b) menor
23. a) 48Ω
b) $0,50 \text{ A}$ em todas elas
c) $V_{AB} = 5,0 \text{ V}$; $V_{BC} = 9,0 \text{ V}$ e $V_{CD} = 10 \text{ V}$
24. a) As três lâmpadas se apagam.
b) As três lâmpadas se apagam.
c) As três lâmpadas se apagam.
25. a) Apenas L_1 se apaga.
b) Apenas L_2 se apaga.
c) As três lâmpadas se apagam.
26. b) $6,0 \Omega$
c) $2,0 \text{ A}$ em cada uma
d) $4,0 \text{ A}$
27. a) Diminui.
b) Não se modificam.
c) $2,0 \text{ A}$
d) Aumenta.
28. a) $0,50 \text{ A}$
b) Diminuirá.
c) $1,0 \text{ A}$
d) 60 lâmpadas
29. a) $2,0 \Omega$
b) $5,0 \Omega$
c) $0,30 \text{ A}$
30. a) em paralelo com a pilha, entre A e B
b) em paralelo com a associação, entre A e D
c) O amperímetro colocado em G medirá tanto a corrente que passa em R_1 quanto em R_2 .
d) em E ou em F
e) em A, M ou N
31. amperímetros: (2) e (5); voltímetros: (1), (3) e (4)
32. aparelho (1): 30 V ; aparelho (2): 1 A ; aparelho (3): 20 V ; aparelho (4): zero; aparelho (5): 3 A
33. Será praticamente zero, porque a resistência do voltímetro é muito grande.
34. a) Veja a fig. 20-32.
b) $R = 15 \Omega$
35. a) Perdem.
b) para o motor da bomba
c) 300 W
d) $1,8 \times 10^5 \text{ J}$
36. a) 4 vezes maior
b) $P = 8,0 \text{ W}$
c) parábola ($P \propto i^2$)
37. a) O ebulidor dissipa 960 W quando ligado em 120 V .
b) $8,0 \text{ A}$
c) 15Ω
38. a) Aumentada.
b) Diminuir.
c) Aumentando.
39. a) igual
b) em R_1
40. a) igual
b) menor
c) em R_2

41. a) Diminui.
b) Aumenta.
c) não
d) sim
42. 4,0 Ω
43. a) 5,0 Ω
b) variação da resistência com a temperatura
44. $\alpha = 4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
45. a) 2×10^3 (isto é, 2 000 vezes maior)
b) 20,1 Ω
46. 716 W
47. 620 $^\circ\text{C}$
48. a) Permanece praticamente constante.
b) Diminui.
c) Aumenta.
49. a) Aumenta consideravelmente.
b) Diminui.
c) Diminui; predomina o aumento do número de elétrons livres.
50. a) zero
b) material supercondutor
51. a) Há perdas, por efeito Joule, na rede de transmissão.
b) praticamente 700 000 kW
c) Manter os cabos abaixo de sua temperatura de transição (temperaturas muito baixas).

Problemas e Testes

1. a) 0,60 A
b) 0,40 A
c) 0,30 A
2. de cobre
3. a) reta passando pela origem
b) (resistividade)/(área da secção reta)
4. 1,5 Ω
5. (c)
6. (b)
7. a) 0,90 V em R_1 ; 0,60 V em R_2 e R_3
b) 0,30 A em R_1 ; 0,20 A em R_2 ; 0,10 A em R_3
8. a) 4,0 Ω
b) 6,0 A
c) $i_1 = 4,0 \text{ A}$; $i_2 = i_3 = i_4 = i_5 = 2,0 \text{ A}$
9. a) maior
b) menor
c) maior
d) maior
10. a) 1,5 A
b) 147 Ω
11. (b), (d)
12. posição (1)
13. Todas estão corretas.
14. (a)
15. (c)
16. (b), (d)
17. a) 60 W
b) 5 W
c) 55 W
18. a) 2 vezes menor
b) 15 W
19. (d)
20. a) $V_1 = 110 \text{ V}$; $V_2 = 0$
b) na de 100 W
c) Diminui; aumenta.
21. a) menor
b) maior
22. a) Diminui.
b) Aumenta.
23. Veja as figuras.
- (a) 
- (b) 
- Resposta do problema 23.**
25. A resistência equivalente será igual a R .
26. a) 560 W
b) 26 Ω
27. 0,96 Ω
28. a) 0,66 Ω
b) fio n $^\circ$ 12
c) sim
29. $R_1 = 6 \Omega$, $R_2 = 5 \Omega$, $R_3 = 20 \Omega$
a) 15 Ω
b) 1,2 A
30. a) 15 Ω
b) 1,2 A
31. 4 R
32. a) zero
b) zero
c) 2 A
33. a) a de 60 W, 120 V: brilho menor
a de 30 W, 120 V: brilho maior
b) menor
34. 15 W
35. A resistência da parte mergulhada torna-se menor.
36. a) C_1 : fio n $^\circ$ 8; C_2 : fio n $^\circ$ 12
b) 220 V: fios de ligação mais finos (mais baratos)

18. a) Emissão de elétrons pela superfície de um metal aquecido.
b) Para que os elétrons livres adquiram energia suficiente para escapar da atração dos íons positivos do metal.
19. a) Filamento, usado para aquecer o catodo C.
b) Catodo, que emite elétrons ao ser aquecido.
c) Anodo (ou placa), que atrai e acelera os elétrons emitidos por C.
20. a) Não, porque P está negativa.
b) anti-horário
21. Veja a figura.



Resposta do exercício 21.

22. a) inferior (+), superior (-).
b) esquerda (+), direita (-).
23. O feixe de elétrons só é emitido após o filamento estar aquecido.
24. a) Adicionar a ele pequenas quantidades de determinadas substâncias (impurezas).
b) Conduz a eletricidade por meio de elétrons livres.
c) Conduz a eletricidade como se houvesse cargas positivas em movimento.
25. a) a válvula termoiônica (diodo).
b) Não há necessidade de aquecimento, têm menor tamanho e custo etc.
26. a) um cristal $n-p-n$ ou $p-n-p$
b) a válvula termoiônica triodo
27. a) A tela está recebendo, constantemente, um feixe de elétrons.
b) negativo
28. a) azul (básico) c) amarelo
b) vermelho (básico) d) branco

Problemas e Testes

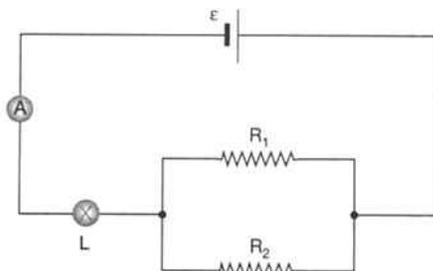
1. a) 0,30 W
b) $5,4 \times 10^3$ J
2. a) igual
b) igual
c) a pilha grande
3. a) 0,50 A
b) $V_1 = 7,5$ V; $V_2 = 4,0$ V
4. amperímetro: 0,60 A; voltímetro: 5,7 V
5. $A = 15$ A; $A_1 = 10$ A; $A_2 = 5,0$ A; $V_1 = V_2 = 15$ V
6. Todas estão corretas.
7. (b), (d)
8. Todas estão corretas.
9. a) zero b) 0,15 A c) 0,15 A

10. a) na resistência de 5,0 Ω
b) 24 V
c) 1,5 W
11. 1,0 A
12. a) 2,0 A
b) 6,0 W
c) Porque a potência dissipada por efeito Joule no motor torna-se muito maior.
13. (b)
14. a) Não se altera. c) Aumenta.
b) Não se altera.
15. a) Diminui. b) Diminui. c) Aumenta.
16. a) 15 V b) 0,30 Ω
17. $V_{AB} = 14$ V
18. $V_{AB} = 8,5$ V
19. $i_3 = 1,5$ A; $R_3 = 20$ Ω
20. $i_1 = 1,0$ A; $i_2 = 1,0$ A; $i_3 = 2,0$ A
21. a) Ganham.
b) Perdem.
c) Perdem.
d) Perdem.
e) Não perdem nem ganham.
22. em B_1 : energia química em energia elétrica
em B_2 : energia elétrica em energia química
em R : energia elétrica em energia térmica
em M : energia elétrica em energia mecânica
entre C e D: não há transformação de energia
23. a) 0,4 A e 2 V
b) $V_{AB} = 3,6$ V
c) $V_{AB} = 3,6$ V
24. a) 360 W c) 90%
b) 400 W d) 91%
25. a) redução no valor da resistência interna
b) 1,2 A
26. 1,5 A
27. queda de tensão nos terminais da bateria
28. a) $V_A = -4$ V
b) $V_B = 7$ V
c) $V_C = 0$
29. a) $i_1 = 0$ e $i_2 = 2$ A c) 12 A
b) $i_1 = 0$ e $i_2 = 0$
30. a) 600 células
b) 360 J
c) 6 lâmpadas

Problemas Suplementares

1. a) 6,25 W e 2,25 W
b) 2,7 vezes menor
2. $R = R_0/\sqrt{2}$
3. a) 6,0 Ω
b) 108 V

- 4. 25%
- 5. $R = 2 \Omega$
- 6. a) 0,25 A
b) Veja a figura.



Resposta do problema suplementar 6-b.

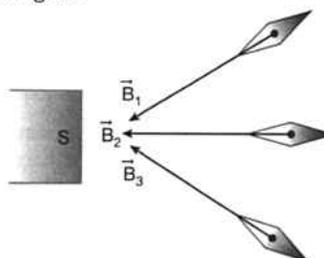
- 7. a) 0,50 A
b) 2,5 V
- 8. 20Ω
- 9. $0,25 \Omega \cdot m$
- 10. a) $2,16 \times 10^5 C$
b) 12 h
- 11. a) 1,0 A
b) $2,0 \Omega$
c) 8,0 V
- 12. circuito III
- 13. $\epsilon = 2,22 V$
- 14. $\epsilon' = 4 V$
- 15. a) $R = r$
b) 50%

CAPÍTULO 22 - O campo magnético - Iª parte

Exercícios de Fixação

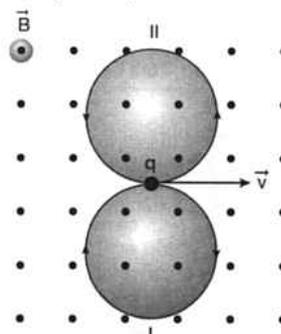
- 1. a) M
b) A é o pólo norte e B é o sul.
- 2. pólo sul
- 3. A: norte; C: sul; D: norte; E: sul; F: norte; B: sul
- 4. a) Atraído.
b) pólo sul magnético
- 5. A agulha deveria estar orientada perpendicularmente ao fio e não paralelamente a ele, como mostra a figura.
- 6. Não, pois a corrente no fio fará a agulha se desviar da direção norte-sul.
- 7. Verificando se a agulha se desvia ao ser aproximada da região da parede onde está o fio.
- 8. a) Existirá apenas a força eletrostática.
b) Existirá apenas a força eletrostática.
c) Existirá uma força eletrostática e uma força magnética.

9. Veja a figura.



Resposta do exercício 9.

- 10. Entrando, porque o norte geográfico é um pólo sul magnético.
- 11. vetor orientado de P para D
- 12. a) $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$
b) $\theta = 90^\circ$
- 13. a) $F = 0$
b) $F = 1,5 \times 10^{-3} N$
c) $F = 3,0 \times 10^{-3} N$
d) $F = 0$
- 14. a) linhas semelhantes às da fig. 22-13
b) Permanece constante, pois o campo é uniforme.
- 15. a) Não há força magnética sobre a partícula.
b) Saindo da folha de papel.
c) de D para F
- 16. a) Não há força magnética sobre a partícula.
b) Penetrando na folha de papel.
c) de F para D
- 17. a) perpendicular a \vec{v} , para a esquerda
b) perpendicular a \vec{B} , para baixo
c) perpendicular a \vec{v} , para a esquerda
- 18. Veja a figura (trajetória I).
- 19. Veja a figura (trajetória II).



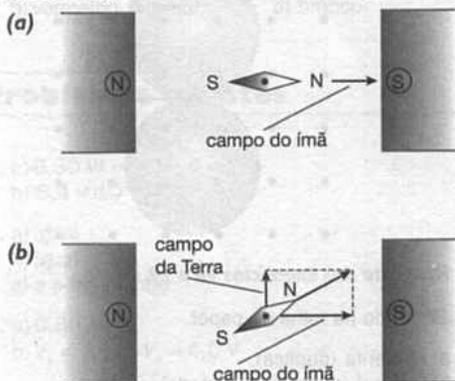
Resposta dos exercícios 18 e 19.

- 20. Entrando na folha de papel.
- 21. a) Aumenta (duplica).
b) Diminui (reduz-se à metade).
c) Não se altera.
- 22. a) $F = 0$
b) $F = 0,15 N$, dirigida para o lado de cima da folha de papel.
- 23. a) Em GE a força está saindo da folha; em ED a força é nula; em DC a força está penetrando na folha.
b) Tende a girar em torno do eixo OP.

24. a) O sentido de rotação é invertido.
b) O sentido de rotação é invertido.
c) O sentido de rotação não se modifica.
25. a) 0,10 N
b) comprimida
c) 5,0 mm
26. o núcleo do átomo de ouro
27. a) igual a 2,5 μ s
b) $f = 2,0 \times 10^3$ hertz
28. Para que não haja colisões dos íons com moléculas do ar.
29. a) 30 volts
b) 15 volts
30. a) Aumenta.
b) Deve ser diminuída.
c) Não há variação sensível de massa.
31. a) retilínea
b) circular de 1,0 m de raio
32. a) Reduzir à metade o valor do campo magnético.
b) Duplicar a frequência do campo elétrico oscilante.

Problemas e Testes

1. 1ª) Suspendendo cada barra pelo seu centro, aquela que for o ímã se orientará na direção norte-sul.
2ª) Aproximando cada barra de um objeto de ferro (não imantado), aquela que atrair o objeto será o ímã.
2. Não, porque a agulha magnética não se orienta em uma dada direção.
3. (d)
4. a) certa
b) certa
c) errada
5. (e)
6. a) Veja a figura. b) Veja a figura.



Resposta do problema 6.

7. a) Perpendicular à folha de papel, penetrando nela.
b) $B = 2,0$ T
8. Todas estão corretas.
9. A: elétrons; B: nêutrons; C: dêuterons; D: prótons;
E: pósitrons

10. a) na direção DC, para cima
b) na direção GF, para F
c) região (1)
11. a) $\theta = 90^\circ$
b) $F = 1,6 \times 10^{-14}$ N
c) $F_c = F = 1,6 \times 10^{-14}$ N
d) 15 cm
12. (a)
13. $v = 5,0 \times 10^4$ m/s
14. (d)
15. a) Reta passando pela origem; sim, pois sabemos que $F \propto i$.
b) $6,0 \times 10^{-3}$ N/A; significa BL.
c) 0,12 T
16. 2,5 A; de A para C
17. $i > 10$ A
18. a) Tomaria a direção vertical, com seu pólo norte voltado para baixo.
b) vertical, para baixo
20. 18 cm
21. Porque elas não são tangentes às forças magnéticas que atuam nas cargas elétricas em movimento.
22. a) Associando-se à resistência interna uma resistência em paralelo.
b) 0,50 Ω
23. a) movimento retilíneo uniformemente acelerado
b) movimento retilíneo uniforme
c) Inicialmente o movimento é retilíneo uniformemente retardado e depois é retilíneo uniformemente acelerado
24. a) de P para Q
b) de N para M
c) $V_N > V_M$
25. a) $B_N = 0$
b) para cima
c) para baixo
26. b) Os isótopos têm massas diferentes.
c) $m = B^2 q R^2 / 2V$
27. a) Entra em rotação no sentido horário.
b) o motor elétrico
28. a) horizontal, para a direita
b) de N para M
c) horizontal, para a direita
d) sim
29. $B = \sqrt{2mE_c / qd}$
30. $R = 6 Bld$

Problemas Suplementares

1. a) $r = mv \cos \theta / Bq$
b) $T = 2\pi m / Bq$
c) $p = 2\pi mv \sin \theta / Bq$

2. O vetor \vec{D} não é bem definido em cada ponto (existem infinitos vetores \vec{D} em um ponto do espaço).
3. $\Delta t = \pi m / Bq$
4. a) q_1 é (+) e q_2 é (-)
b) $m_1 = 2m_2$
5. $i = 5,0$ A de M para N
6. $i = 7,5$ A
7. 10 cm
8. a) 90°
b) forma circular
9. $B = 0,43$ T
10. $M = BiA$
11. a) não
b) Todas têm o mesmo período.
12. $F = 7,0$ N; vertical, para baixo
13. a) 0,30 N
b) 0,42 N
c) zero
14. O feixe é constituído de pósitrons.
15. forma circular

CAPÍTULO 23 - O campo magnético - 2ª parte

Exercícios de Fixação

1. Em P e Q : entrando na folha de papel; em M e R : saindo da folha de papel.
2. a) 12×10^{-4} T
b) $4,0 \times 10^{-4}$ T
3. a) Ambos são verticais, dirigidos para cima.
b) $B_2 = 1,5 \times 10^{-4}$ T
c) $B = 4,5 \times 10^{-4}$ T, vertical, para cima
4. a) \vec{B}_1 : vertical, para cima; \vec{B}_2 : vertical, para baixo
b) $B_1 = 1,0 \times 10^{-4}$ T e $B_2 = 1,5 \times 10^{-4}$ T
c) $B = 0,5 \times 10^{-4}$ T, vertical, para baixo
5. vertical, para cima
6. $8,0 \times 10^{-4}$ T
7. $i_1 = 10$ A, em sentido contrário a i_2
8. $3,2 \times 10^{-4}$ T, perpendicular à folha de papel e saindo dela.
9. a) pólo norte
b) de G para F
10. D
11. a) igual
b) maior
c) $B_2 = 3,0 \times 10^{-3}$ T
12. $i_2 = 2,0$ A

13. a) Semelhante à fig. 23-21, mas as linhas entram no pólo sul do ímã.
b) Orientados de F para G .
c) pólo norte
d) Atraído.
14. b) Orientado de G para F .
c) pólo sul
d) Repelida.
15. pólo norte em G e pólo sul em F
16. a) Não atrairá. b) Atrairá.
17. Porque a elevação de temperatura provoca um aumento da agitação térmica, desfazendo a orientação dos ímãs elementares.
18. a) do anodo para o catodo
b) do catodo para o anodo
19. a) São radiações emitidas pelo catodo.
b) sempre na parte do tubo frontal ao catodo
20. Seriam: 1º) ondas de mesma natureza que a luz ou 2º) partículas eletrizadas negativamente.
21. a) para baixo
b) As ondas luminosas não são desviadas por um campo magnético, nem por um campo elétrico.
22. a razão carga/massa de cada partícula (do elétron)
23. a) elétron e pósitron
b) elétron e pósitron
c) partícula α
d) nêutron
24. a) 40 vezes
b) Não, pois o valor de R seria cerca de 2,0 m!
25. A razão carga/massa tinha sempre o mesmo valor.
26. Usando-se o valor da carga do elétron medido por Millikan.

Problemas e Testes

1. a) sim b) não
2. a) perpendicular ao fio, para a direita
b) Não haverá força magnética sobre o elétron.
3. a) O pólo norte da agulha ficará voltado para oeste.
b) O pólo norte da agulha ficará voltado para noroeste.
4. a) Veja a tabela:

r (cm)	B (T)
1,0	$6,0 \times 10^{-5}$
2,0	$3,0 \times 10^{-5}$
3,0	$2,0 \times 10^{-5}$
4,0	$1,5 \times 10^{-5}$
5,0	$1,2 \times 10^{-5}$

- c) hipérbole (proporção inversa)
5. (c)
6. (d)

7. a) Penetrando no papel.
b) Saindo do papel.
c) para a esquerda
d) para a direita
e) Atraem-se.
8. a) Penetrando no papel.
b) Penetrando no papel.
c) para a direita
d) para a esquerda
e) Repelem-se.
9. Irão se repelir.
10. Todas são corretas.
11. (b)
12. (c)
13. $B_r = B = 2,7 \times 10^{-5} \text{ T}$
14. G é o pólo norte e F é o pólo sul.
15. Acionando-se o interruptor I , estabelece-se uma corrente no circuito e o núcleo do eletroímã se imanta. A plaqueta P é atraída, provocando uma batida do martelo M . Então, o contato em C se desfaz, o eletroímã deixa de atrair P , e a mola, puxando a plaqueta, restabelece o contato em C . A partir daí o processo se repete.
16. São pontos de uma reta situada acima do fio e paralela a ele.
a) sim
b) não
17. a) sim
b) não
18. A resultante é nula.
19. Não modifica.
20. $F = 3,2 \times 10^{-4} \text{ N}$, perpendicular a R , para a direita
21. $2,5 \times 10^{-5} \text{ T}$
22. a) Os fios se aproximam um do outro.
b) Os fios se afastam um do outro.
23. $1,8 \times 10^{-4} \text{ N/m}$
24. As espiras se atraem mutuamente, desfazendo o contato com o mercúrio e voltam, então, a se distender (e, assim, sucessivamente).
25. a) Diminui.
b) hipérbole
26. a) paralelo
b) Quando o circuito do relé é fechado, a pequena barra de ferro é atraída pela bobina, ocasionando o fechamento do circuito do motor; quando desligado, a pequena barra é puxada pela mola, desligando o motor.
27. Ao se abrir a porta ou a janela, o relé é desarmado, fechando-se o circuito da campainha.
28. a) Oscila, para a frente e para trás, ao longo do seu eixo.
b) longitudinal
c) igual
d) amplitude
29. O sentido da corrente nas espiras mostra que, em cada ramo do U , os campos magnéticos têm sentidos contrários.
30. a) o eletroímã
b) A bobina é usada para aumentar o brilho da lâmpada, indicando que a máquina está em funcionamento.

Apêndice E

Exercícios de Fixação

1. a) N/A^2
b) N/A^2
2. M é diamagnético; N é paramagnético e P é ferromagnético.
3. $\Delta B = 0$ (porque $\theta = 180^\circ$)
4. $\Delta B = 5,0 \times 10^{-8} \text{ T}$; perpendicular ao plano da espira; saindo da folha de papel.
5. $\Delta B = 2,5 \times 10^{-8} \text{ T}$
6. a) $\Delta B' = 4,0 \times 10^{-8} \text{ T}$; perpendicular ao plano da espira; saindo da folha de papel.
b) $9,0 \times 10^{-8} \text{ T}$
7. a) sentido anti-horário
b) $i = 5,0 \text{ A}$
8. a) $B_1 = 3,14 \times 10^{-5} \text{ T}$; saindo do plano da figura.
b) $B_2 = 1,25 \times 10^{-5} \text{ T}$; saindo do plano da figura.
c) $B = 4,39 \times 10^{-5} \text{ T}$; saindo do plano da figura.
9. $i_2 = 7,5 \text{ A}$; no sentido horário
10. a) $B_c > B_p$
b) $B_p = 1,0 \times 10^{-5} \text{ T}$
11. a) $B_1 = 5,0 \times 10^{-6} \text{ T}$; entrando no plano da figura.
b) $B_2 = 4,0 \times 10^{-6} \text{ T}$; entrando no plano da figura.
c) $B = 9,0 \times 10^{-6} \text{ T}$; entrando no plano da figura.
12. $i_2 = 2,5 \text{ A}$; sentido contrário a i_1
13. a) $n = 530$ espiras/m
b) 79,5 espiras
14. a) mesmo sentido
b) $1,88 \times 10^{-2} \text{ T}$

Problemas Suplementares

1. a) horizontal, para a esquerda
b) $\Delta B_2 = 0$; $\Delta F_{21} = 0$
c) 3ª lei de Newton
2. $B = \mu_0 i / 12R$
3. a) zero
b) $B = \mu_0 i / 24a$
4. $B = \mu_0 i / 4R$
5. a) zero
b) $\mu_0 i / 12R$
6. a) $B = 2,1 \times 10^{-5} \text{ T}$
b) 5,0 A
7. 8,0 A
8. $B_r = 3,3 \times 10^{-5} \text{ T}$
9. $B = 5,0 \times 10^{-5} \text{ T}$
10. a) de cima para baixo
b) $i_2 = 15 \text{ A}$

34. a) 20 A
b) 1 200 W
c) 50%
d) 1 200 W
35. a) 4,0 A
c) 2%
- b) 48 W
d) 2 352 W
36. a) Não, pois o transformador não funciona com corrente contínua.
37. a) Significa "voltagem elevada", que tem como consequência a redução da corrente, diminuindo as perdas por efeito Joule na transmissão.
b) A facilidade com que sua voltagem pode ser aumentada ou diminuída, por meio de transformadores.
38. a) 3 vezes
b) subestação da usina — elevação subestação da cidade — redução transformador do poste — redução
c) Diminui; aumenta; aumenta.
39. a) voltagem eficaz
b) Voltagem contínua que, durante um período, dissipa em uma resistência a mesma quantidade de calor que a voltagem alternada.
c) 308 V
40. a) 0,70 A
b) 0,50 A
c) 1 100 J
41. a) Uso de apenas dois cabos e de menor diâmetro.
b) Há custos de retificação e de posterior alternância.
42. a) CA
b) sim
c) após a elevação da voltagem
d) Para que seja possível reduzir sua voltagem.

Problemas e Testes

1. a) lado direito
b) 0,36 V
2. Todas estão corretas.
3. a) Diminuindo.
b) sentido GFHD
4. (d)
5. (d), (e)
6. Todas estão corretas.
7. a) de F para D
b) Repelido.
8. 0,157 s
9. a) 110 V
b) 110 V
c) 220 V
10. a) 20 espiras
b) 5,0 A
c) 0,50 A
11. microondas
12. a) Estas denominações se referem aos valores dos comprimentos de onda:
 λ (onda longa) $>$ λ (onda média) $>$ λ (onda curta).
b) onda curta

13. a) 0,02 N para a esquerda
b) 0,10 J
c) 0,10 J
d) Porque toda a energia mecânica transferida à espira (trabalho realizado sobre ela) se transforma em calor por efeito Joule.
14. a) 20 espiras
b) 5,0 A
c) 0,55 A
15. O transformador reduz a voltagem alternada para 12 V e o retificador faz com que a bateria receba corrente contínua (o reostato serve apenas para controlar o valor da corrente).
16. O circuito do primário é semelhante ao de uma campanha (problema 15 do capítulo 23). Como este circuito se abre e se fecha sucessivamente no contato C, haverá um fluxo variável no secundário. Então aparecerá, no secundário, uma voltagem induzida de valor elevado, porque N_2 é muito maior do que N_1 .
17. a) 4,0 A
b) zero
c) 4,0 A em sentido contrário à corrente de (a)
18. a) 2,0 V
b) 2,0 V
19. a) $2,0 \times 10^{-2}$ C
b) não
20. a) de N para M
b) sim; não
21. a) anti-horário
b) horário
22. 1,0 A
23. $3,9 \times 10^{26}$ W
24. Menor, qualquer que seja a direção e o sentido do movimento da locomotiva.
25. Com o circuito fechado, aparece uma força magnética que se opõe à rotação do gerador.
26. em II e em IV
27. a) nas situações I, II e III
b) menor
28. Diminui.
29. a) $\epsilon = 3b$
b) de M para N
30. a) $v = \sqrt{k_0/C_0}$
b) $v = 3,0 \times 10^6$ m/s
c) sim

Apêndice F

Exercícios de Fixação

1. $C = 3,0 \times 10^{-6}$ F = 3,0 μ F
2. a) $C = 3,0 \times 10^{-6}$ F
b) $7,5 \times 10^{-4}$ C

3. a) Não se altera.
b) Aumenta.
c) Aumenta.
4. a) $12,5 \mu\text{F}$
b) $4,0 \times 10^{-4}$
c) 32 V
d) 8 000 N/C
5. a) paralelo
b) 150 V
c) $6,0 \mu\text{F}$
6. a) $3,0 \times 10^{-4}$ C
b) $6,0 \times 10^{-4}$ C
c) $9,0 \times 10^{-4}$ C
7. a) série
b) igual
8. a) $1,3 \mu\text{F}$
b) $1,3 \times 10^{-4}$ C
9. a) paralelo; paralelo
b) série
c) associação mista
10. a) $4,0 \mu\text{F}$
b) $1,2 \times 10^{-3}$ C
11. a) 0,70 J
b) 0,70 J
12. 0,16 cal
13. a) sim
b) Aumenta.
14. a) Não se altera.
b) Diminui.
c) 1 000 V
15. a) 1,4 J
b) sim

16. a) Não se altera.
b) Duplica.
c) Torna-se 4 vezes maior.

Problemas e Testes

1. a) $3,0 \times 10^2$ V
b) $1,2 \times 10^{-3}$ C
2. (c)
3. (d)
4. Todas estão corretas.
5. (d)
6. a) $6,0 \mu\text{C}$
b) $1,5 \mu\text{C}$
7. a) $1,0 \mu\text{C}$
b) $2,0 \times 10^{-4}$ C
8. Todos os três possuem a mesma constante de tempo.
9. (e)
10. C_0
11. 300 C
12. $9,0 \times 10^{10}$ J
13. a) Todos "darão fuga".
b) Nenhum deles "dará fuga".
14. a) 0,12 J
b) 0,08 J
c) 0,04 J
15. $8,1 \times 10^{-2}$ J
16. a) zero
b) $16 \mu\text{C}$

Respostas das questões de vestibular

capítulo 17 - Carga elétrica

1. c
2. e
3. a
4. a
5. b
6. d
7. c
8. b
9. c
10. a
11. c
12. b
13. c

capítulo 18 - Campo elétrico

1. e
2. b
3. d
4. e
5. e
6. I. correta; II. correta; III. errada
7. e
8. b
9. e
10. d
11. a
12. b
13. c
14. a
15. d

capítulo 19 - Potencial elétrico

1. a
2. I. correta; II. errada; III. errada
3. e
4. d
5. b
6. d
7. b
8. I. errada; II. errada; III. correta
9. e
10. b
11. b
12. b
13. e
14. I. correta; II. correta; III. errada
15. d
16. b
17. b
18. e
19. c
20. e
21. d
22. d
23. e
24. a
25. c
26. c

capítulo 20 - Corrente elétrica

1. d
2. b
3. d
4. a
5. a

- 6. b
- 7. a
- 8. e
- 9. a
- 10. b
- 11. I. errada; II. correta; III. correta
- 12. a
- 13. b
- 14. b
- 15. c
- 16. e
- 17. c
- 18. a
- 9. c
- 20. d
- 21. I. errada; II. errada; III. correta
- 22. d
- 23. b
- 24. d
- 25. a
- 26. c
- 27. e
- 28. b
- 29. b
- 30. d

capítulo 21 - Força eletromotriz - Equação do circuito

- 1. I. errada; II. errada; III. correta
- 2. c
- 3. c
- 4. a
- 5. c
- 6. b
- 7. b
- 8. e
- 9. d
- 10. e
- 11. d
- 12. a
- 13. a
- 14. c

- 15. Todas estão corretas.
- 16. c
- 17. d
- 18. d
- 19. a
- 20. a
- 21. d
- 22. d
- 23. c
- 24. b
- 25. b

capítulo 22 - O campo magnético - 1ª parte

- 1. d
- 2. e
- 3. c
- 4. I. errada; II. correta; III. correta
- 5. a
- 6. a
- 7. c
- 8. I. correta; II. errada; III. correta
- 9. a
- 10. Todas estão erradas.
- 11. d
- 12. b
- 13. a
- 14. c
- 15. b
- 16. e
- 17. d
- 18. b
- 19. d
- 20. e

capítulo 23 - O campo magnético - 2ª parte

- 1. c
- 2. d
- 3. a
- 4. e
- 5. d

6. Todas estão erradas.

7. e

8. b

9. a

10. b

11. c

12. d

13. a

14. c

capítulo 24 - Indução eletromagnética – Ondas eletromagnéticas

1. b

2. b

3. c

4. b

5. c

6. b

7. d

8. d

9. a

10. a

11. I. correta; II. errada; III. errada

12. d

13. d

14. I. correta; II. errada; III. errada

15. a

16. b

17. I. correta; II. errada; III. errada

18. d

19. I. correta; II. errada; III. errada

20. I. errada; II. correta; III. correta

21. I. correta; II. errada; III. errada

22. a

23. c

24. d

25. a

26. e

27. d

28. c

29. b

30. c

Apêndice F

1. a

2. b

3. b

4. d

5. c

6. a

7. d

8. b

9. c

10. b

11. a

12. d

13. c

14. d

15. d

16. b

17. c

18. a

19. a

Questões de Interpretação de Textos

1. c

2. d

3. d

4. d

5. d

6. c

7. b

8. a

9. d

10. a

11. a

12. c

13. e

14. c

15. b

16. d

17. e

18. c

19. c

20. e

Valores das funções trigonométricas									
Ângulo		Seno	Co-seno	Tangente	Ângulo		Seno	Co-seno	Tangente
Graus	Radianos				Graus	Radianos			
0	0,0000	0,000	1,000	0,000					
1	0,0175	018	1,000	018	46	0,8029	719	695	1,036
2	0,0349	035	0,999	035	47	0,8203	731	682	1,072
3	0,0524	052	999	052	48	0,8378	743	669	1,111
4	0,0698	070	998	070	49	0,8552	755	656	1,150
5	0,0873	087	996	088	50	0,8727	766	643	1,192
6	0,1047	105	995	105	51	0,8901	777	629	1,235
7	0,1222	122	993	123	52	0,9076	788	616	1,280
8	0,1396	139	990	141	53	0,9250	799	602	1,327
9	0,1571	156	988	158	54	0,9425	809	588	1,376
10	0,1745	174	985	176	55	0,9599	819	574	1,428
11	0,1920	191	982	194	56	0,9774	829	559	1,483
12	0,2094	208	978	213	57	0,9948	839	545	1,540
13	0,2269	225	974	231	58	1,0123	848	530	1,600
14	0,2443	242	970	249	59	1,0297	857	515	1,664
15	0,2618	259	966	268	60	1,0472	866	500	1,732
16	0,2793	276	961	287	61	1,0647	0,875	0,485	1,804
17	0,2967	292	956	306	62	1,0821	883	470	1,881
18	0,3142	309	951	325	63	1,0996	891	454	1,923
19	0,3316	326	946	344	64	1,1170	899	438	2,050
20	0,3491	342	940	364	65	1,1345	906	423	2,145
21	0,3665	358	934	384	66	1,1519	914	407	2,246
22	0,3840	375	927	404	67	1,1694	921	391	2,356
23	0,4014	391	921	425	68	1,1868	927	375	2,475
24	0,4189	407	914	445	69	1,2043	934	358	2,605
25	0,4363	423	906	466	70	1,2218	940	342	2,747
26	0,4538	438	899	488	71	1,2392	946	326	2,904
27	0,4712	454	891	510	72	1,2566	951	309	3,078
28	0,4887	470	883	532	73	1,2741	956	292	3,271
29	0,5061	485	875	554	74	1,2915	951	276	3,487
30	0,5236	500	866	577	75	1,3090	966	259	3,732
31	0,5411	0,515	0,857	0,601	76	1,3265	0,970	0,242	4,011
32	0,5585	530	848	625	77	1,3439	974	225	4,331
33	0,5760	545	839	649	78	1,3614	978	208	4,705
34	0,5934	559	829	675	79	1,3788	982	191	5,145
35	0,6109	574	819	700	80	1,3963	985	174	5,671
36	0,6283	588	809	727	81	1,4137	988	156	6,314
37	0,6458	602	799	754	82	1,4312	990	139	7,115
38	0,6632	616	788	781	83	1,4486	994	122	8,144
39	0,6807	629	777	810	84	1,4661	995	105	9,514
40	0,6981	643	766	839	85	1,4835	996	087	11,43
41	0,7156	656	755	869	86	1,5010	998	070	14,30
42	0,7330	669	743	869	87	1,5184	999	052	19,08
43	0,7505	682	731	933	88	1,5359	999	035	28,64
44	0,7679	695	719	966	89	1,5533	1,000	018	57,29
45	0,7854	707	707	1,000	90	1,5708	1,000	000	∞

Constantes físicas	
Velocidade da luz	$3,0 \times 10^8$ m/s
Constante gravitacional	$6,67 \times 10^{-11}$ N · m²/kg²
Massa do elétron (em repouso)	$9,11 \times 10^{-31}$ kg
Massa do próton (em repouso)	$1,67 \times 10^{-27}$ kg
Pressão atmosférica normal	$1,01 \times 10^5$ N/m²
Raio médio da Terra	$6,37 \times 10^6$ m
Distância média da Terra ao Sol	$1,49 \times 10^8$ km
Distância média da Terra à Lua	$3,8 \times 10^5$ km
Massa da Terra	$5,98 \times 10^{24}$ kg
Massa do Sol	$2,0 \times 10^{30}$ kg
Carga do elétron (carga elementar)	$1,6 \times 10^{-19}$ C
Constante de Boltzmann	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
Constante da lei de Coulomb (para o vácuo)	$9,00 \times 10^9$ N · m²/C²
Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ J · s
Constante universal dos gases	8,31 joule/K mol

BIBLIOGRAFIA INDICADA PARA OS ALUNOS

A lista apresentada a seguir é sugerida para tentar ampliar seus conhecimentos e incentivá-los a fazer outras leituras além do livro didático.

Seu(sua) professor(a) poderá orientá-los por onde começar, como ir adquirindo cada obra, como desenvolver um esforço para incorporá-los na biblioteca de sua escola, como desenvolver o hábito e aperfeiçoar a leitura, por exemplo, fazendo discussões em grupo, etc.

Boa leitura!

- ARRIBAS, S. D. *Experiências de física ao alcance da escola*. Passo Fundo: UFP, 1987.
- BERNAL, J. D. *Ciência na história*. V. 1-7. Lisboa: Livros Horizonte, 1969.
- CARVALHO, R. P. *Física do dia-a-dia*. Belo Horizonte: Gutenberg, 2003.
- DAOU, L. e CARUSO, F. *Tirinhas de Física*. Vols. 1 a 6. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Ensino de Física, 2000-2002.
- DAWKINS, R. *Desvendando o arco-íris*. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.
- ECO, U.; DELUMEAU, J.; GOULD, J. S.; CARRIÈRE, J-C. *Entrevista sobre o fim dos tempos*. Rio de Janeiro: Rocco, 1998.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Nacional, 1941.
- FEYNMAN, R.P. *Está a brincar, Sr. Feynman!* Lisboa: Gradiva, 1988.
- _____. *P. Física em seis lições*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1995.
- FIOLHAIS, C. *Física divertida*. Lisboa: Gradiva, 1991.
- GILMORE, R. *Alice no país do quantum*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.
- _____. *O mágico dos quarks*. São Paulo: Jorge Zahar, 2001.
- GLEISER, M. *O fim da terra e do céu*. São Paulo: Schwarcz, 2001.
- GOLDEMBERG, J. *Energia no Brasil*. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- GONICK, et alii. *Introdução ilustrada à Física*. São Paulo: Harbra, 1994.
- HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- MARTINS, J. B. *José Leite Lopes – O homem de ciência*. Rio de Janeiro: Nova Stella, 1990.
- MENEZES, L. C. *Vale a pena ser físico?* São Paulo: Moderna, 1988.
- OKUNO, E. *Radiação ultravioleta: características e efeitos*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- PANZERA, Á. C. *Estrelas e planetas*. Belo Horizonte: UFMG, 2001.
- PARKER, S. *Marie Curie e a radioatividade*. São Paulo: Scipione, 1997. (Caminhos da Ciência)
- PAULINO, J. O. S. *Raios e trovões*. Belo Horizonte: UFMG, 1997.
- PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou, 1980.
- PRADO, F. B. L. *Observações astronômicas: como e para quê*. Belo Horizonte: UFMG, s/d.
- PRICE, D. S. *O homem e a ciência – A ciência desde a Babilônia*. Belo Horizonte: Itatiaia, 1976.
- SAGAN, C. *O mundo mal assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
- STRATHERN, P. *Arquimedes e a alavanca em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Aristóteles em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Filósofos em 90 Minutos)

- _____. *Bohr e a teoria quântica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Einstein e a relatividade em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Galileu e o sistema solar em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Hawking e os buracos negros em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Platão em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Filósofos em 90 Minutos)
- _____. *Sócrates em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Filósofos em 90 Minutos)
- THUILLIER, P. *De Arquimedes a Einstein*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1988. (Ciência e Cultura)
- VALADARES, E. C. *Física mais que divertida*. Belo Horizonte: UFMG, 2000.
- WALKER, J. *O grande circo da física*. Lisboa: Gradiva, 1990.
- ZIMAN, J. *A força do conhecimento*. São Paulo: Edusp, 1981.

Os livros da lista abaixo, apesar de não serem publicados em português, são de leitura bastante interessante e acessível. Se houver disponibilidade e interesse, não será difícil adquiri-los pela Internet.

- ARMSTRONG, T. *Make moving patterns*. Norfolk: Tarquin, 1982.
- BOLTON, L. *Hidden pictures*. New York: Penguin, 1993.
- CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE. *La lumière démasquée*. Paris.
- ERNST, B. *Le monde des illusions d'optique*. Berlim: Taschen, 1986.
- _____. *Adventure with impossible figures*. Norfolk: Tarquin, 1986.
- JENNINGS, T. *101 illusions d'optique*. Paris: Gründ, 1996.
- HAWKING, S. *Commencement du temps set fin de la physique?* Paris: Flammarion, 1992.
- LINDLEY, D. *The end of physics. The myth of unified theory*. New York: Basic Books, 1993.
- MARCH, R. H. *Physics for poets*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- MOSCOVICH, I. *Magic cylinder book*. Norfolk: Tarquin, 1988.
- NORRETRANDERS, T. *The user illusion*. London: Penguin, 1999.
- PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.
- SMITH, A. *The Usborne big book of experiments*. London: Usborne, 1996.
- SHOGAKUKAN, I. *Stereogram*. London: Boxtree, 1994.
- WATSON, P. *La lumière fantastique*. Paris: Albin Michel Jeunesse, 1982.

Páginas indicadas para pesquisa e consulta

- Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro — www.bibvirt.futuro.usp.br/principal.html
- Estação Ciência — www.eciencia.com.br: A estação Ciência é um centro de difusão científica, tecnológica e cultural criado pela Pró-Reitoria da USP.
- Laboratório de Ensino de Ciências e Tecnologia (USP) — <http://www.darwin.futuro.usp.br/>
- Revista Nova Escola — www.novaescola.com.br (www.programaescoladigital.com.br) ensina a usar o computador)