VOLUME 3

ELETRICIDADE E MAGNETISMO

FÍSICA

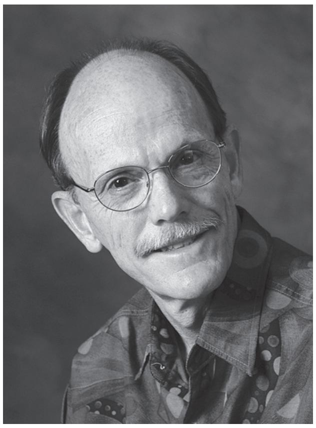
UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA

2ª EDIÇÃO

bookman®

RANDALL D. KNIGHT

Sobre o Autor



Randy Knight leciona Física básica há 25 anos na Ohio State University, EUA, e na Califórnia Polytechnic University, onde atualmente é professor de física. O professor Knight bacharelou-se em Física pela Washington University, em Saint Louis, e doutorou-se em Física pela University of Califórnia, Berkeley. Fez pós-doutorado no Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, antes de trabalhar na Ohio State University. Foi aí que ele começou a pesquisar sobre o ensino da física, o que, muitos anos depois, o levou a escrever este livro.

Os interesses de pesquisa do professor Knight situam-se na área de laser e espectroscopia, com cerca de 25 artigos de pesquisa publicados. Ele também dirige o programa de estudos ambientais da Cal Poly, onde, além de física introdutória, leciona tópicos relacionados a energia, oceanografia e meio ambiente. Quando não está em sala de aula ou na frente de um computador, o professor Knight está fazendo longas caminhadas, remando em um caiaque, tocando piano ou usufruindo seu tempo com a esposa Sally e seus sete gatos.

K71f Knight, Randall D.
Física 3 [recurso eletrônico] : uma abordagem estratégica / Randall Knight ; tradução Manuel Almeida Andrade Neto. – 2. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : Bookman, 2009.

Editado também como livro impresso em 2009.
ISBN 978-85-7780-553-2

1. Física. 2. Eletricidade. 3. Magnetismo. I. Título.

CDU 537

Catalogação na publicação: Renata de Souza Borges CRB-10/1922

31.4 Condutividade e resistividade

A densidade de corrente $J = n_e e v_d$ é diretamente proporcional à velocidade de deriva v_d dos elétrons. Anteriormente, usamos o modelo microscópico da condução elétrica para determinar que a velocidade de deriva é dada por $v_d = e\tau E/m$, onde τ é o tempo médio entre as colisões e m é a massa de um elétron. Combinando isto, obtemos a densidade de corrente dada por

$$J = n_e e v_d = n_e e\left(\frac{e\tau E}{m}\right) = \frac{n_e e^2 \tau}{m} E \tag{31.16}$$

A grandeza $n_e e^2\tau/m$ depende *apenas* do material condutor. De acordo com a Equação 31.16, uma determinada intensidade de campo elétrico dará origem a uma densidade de corrente maior em um material que possua uma grande densidade de elétrons n_e ou em materiais para os quais os tempos de colisão τ são mais longos do que em materiais com valores menores. Em outras palavras, tal material é um *melhor condutor* de corrente.

Faz sentido, então, definir a **condutividade** σ de um material como

$$\sigma = \text{condutividade} = \frac{n_e e^2 \tau}{m} \tag{31.17}$$

A condutividade, como a densidade, caracteriza qualquer material como um todo. Todos os pedaços feitos de cobre (a uma mesma temperatura) possuem o mesmo valor de σ, mas a condutividade do cobre é diferente da do alumínio. Note que o tempo médio entre colisões τ pode ser inferido dos valores medidos da condutividade.

Com essa definição de condutividade, a Equação 31.16 assume a forma

$$\boxed{J = \sigma E} \tag{31.18}$$

Este é um resultado de importância fundamental. A Equação 31.18 nos informa três coisas:

1. Toda corrente é causada por um campo elétrico que exerce forças sobre os portadores de carga.
2. A densidade de corrente, e aqui a corrente $I = JA$, depende linearmente da intensidade do campo elétrico. Para dobrar a intensidade de corrente, devemos dobrar a intensidade do campo elétrico que empurra as cargas.
3. A densidade de corrente também depende da *condutividade* do material. Materiais condutores diferentes possuem diferentes condutividades porque possuem valores distintos de densidade eletrônica e, especialmente, de tempo médio entre colisões sucessivas de elétrons com os átomos da rede.

O valor da condutividade é afetado pela estrutura cristalina do metal, por impurezas presentes e pela temperatura. À medida que a temperatura aumenta, também aumentam as vibrações térmicas dos átomos da rede. Isto faz com que os átomos se tornem "alvos maiores", ocasionando colisões mais freqüentes, diminuindo, assim, o valor de τ e, conseqüentemente, o da condutividade. Os metais conduzem melhor a eletricidade a baixas temperaturas do que a altas temperaturas.

Em muitas aplicações práticas da corrente, será conveniente utilizar o inverso da condutividade, que é denominado **resistividade**:

$$\rho = \text{resistividade} = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{n_e e^2 \tau} \tag{31.19}$$

Esta mulher mede a porcentagem de gordura do corpo segurando um dispositivo que envia uma pequena corrente elétrica através do seu corpo. Como o tecido muscular e o tecido adiposo têm resistividades diferentes, a intensidade de corrente permite determinar a razão gordura-músculo.

A resistividade de um material nos diz como, relutantemente, os elétrons se movem em resposta a um campo elétrico. A Tabela 31.2 fornece valores medidos de resistividade e de condutividade para diversos metais e para o carbono. Note como eles variam bem pouco entre si, com o cobre e a prata sendo os dois melhores condutores.

A unidade de condutividade, a partir da Equação 31.18, é a mesma de J/E, nominalmente, $\mathrm{AC/Nm^2}$. Elas não são de uso prático. Nas próximas seções introduziremos uma nova unidade denominada *ohm*, e simbolizada por Ω (a letra grega maiúscula ômega). Veremos que a resistividade tem como unidade o Ωm, e a condutividade, o $\Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$.

EXEMPLO 31.6 Campo elétrico em um fio

Um fio de alumínio com 2,0 mm de diâmetro conduz uma corrente de 800 mA. Qual é a intensidade do campo elétrico no fio?

RESOLUÇÃO A intensidade de campo elétrico é

$$E = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{\sigma A} = \frac{I}{\sigma \pi r^2} = \frac{0{,}80\ \mathrm{A}}{(3{,}5 \times 10^7\ \Omega^{-1}\ \mathrm{m}^{-1})\pi(0{,}0010\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 0{,}0072\ \mathrm{V/m}$$

onde a condutividade do alumínio foi obtida da Tabela 31.2.

AVALIAÇÃO Trata-se de um campo *muito* fraco comparado com os que calculamos nos Capítulos 26 e 27 para cargas puntiformes e objetos carregados. Este cálculo justifica a afirmação vista na Tabela 27.1 de que uma intensidade típica de campo elétrico no interior de um fio que conduz uma corrente é $\approx 0{,}01$ V/m.

TABELA 31.2 Resistividade e condutividade de materiais condutores

Material	Resistividade (Ωm)	Condutividade (Ω^{-1}m^{-1})
Alumínio	$2{,}8 \times 10^{-8}$	$3{,}5 \times 10^{7}$
Cobre	$1{,}7 \times 10^{-8}$	$6{,}0 \times 10^{7}$
Ouro	$2{,}4 \times 10^{-8}$	$4{,}1 \times 10^{7}$
Ferro	$9{,}7 \times 10^{-8}$	$1{,}0 \times 10^{7}$
Prata	$1{,}6 \times 10^{-8}$	$6{,}2 \times 10^{7}$
Tungstênio	$5{,}6 \times 10^{-8}$	$1{,}8 \times 10^{7}$
Nicromo*	$1{,}5 \times 10^{-6}$	$6{,}7 \times 10^{5}$
Carbono	$3{,}5 \times 10^{-5}$	$2{,}9 \times 10^{4}$

*Liga de níquel-cromo usada para fabricar fios de resistência elétrica elevada e que suportam temperaturas elevadas.

EXEMPLO 31.7 Tempo médio entre colisões

Qual é o tempo médio entre colisões sucessivas de elétrons no cobre?

RESOLUÇÃO O tempo médio entre colisões está relacionado à condutividade do material por

$$\tau = \frac{m\sigma}{n_e e^2}$$

A densidade eletrônica do cobre se encontra na Tabela 31.1 e a condutividade medida é encontrada na Tabela 31.2. Com essas informações,

$$\tau = \frac{(9{,}11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg})(6{,}0 \times 10^7\ \Omega^{-1}\ \mathrm{m}^{-1})}{(8{,}5 \times 10^{28}\ \mathrm{m}^{-3})(1{,}60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})^2} = 2{,}5 \times 10^{-14}\ \mathrm{s}$$

Este foi o valor de τ utilizado no Exemplo 31.3.

A intensidade de campo elétrico determinada no Exemplo 31.6 é, aproximadamente, igual à intensidade de campo elétrico a 1,0 mm de um *único* elétron. A lição a ser aprendida deste exemplo é de que são necessárias *poucas* cargas superficiais sobre um fio para criar o campo elétrico interno necessário para empurrar uma corrente considerável através do fio. Somente alguns poucos elétrons em excesso em cada centímetro do fio são suficientes. A razão, mais uma vez, é o enorme valor da densidade de portadores de carga n_e. Embora o campo elétrico seja muito pequeno, e a velocidade de deriva, agonizantemente lenta, um fio pode conduzir uma corrente substancial devido ao enorme número de portadores de carga capazes de se mover.

Supercondutividade

Em 1911, o físico holandês Kamerlingh Onnes estava estudando a condutividade dos metais a temperaturas muito baixas. Os cientistas tinham descoberto recentemente como liquefazer o hélio, e isso abriu todo um novo campo, o da *física de baixas temperaturas*. Como já observamos, os metais se tornam melhores condutores a temperaturas mais baixas (i.e., apresentam condutividade mais alta e resistividade mais baixa). Mas o efeito normalmente é gradual. Onnes, entretanto, descobriu que o mercúrio perde *toda* a resistência à corrente de forma súbita e drástica ao ser resfriado abaixo de 4,2 K. Tal perda completa da resistência a baixas temperaturas é chamada de **supercondutividade**.

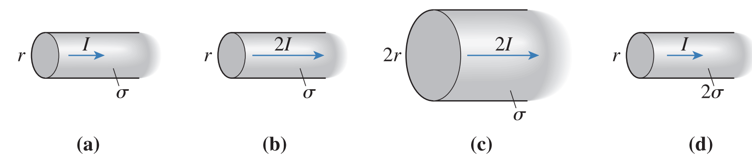
Experimentos posteriores estabeleceram que a resistividade de um metal supercondutor não apenas é pequena, mas é realmente nula. Os elétrons se movem em um ambiente sem atrito, e a carga continuará se movendo através de um supercondutor *sem a presença de um campo elétrico*. O fenômeno da supercondutividade não foi compreendido até 1950, quando foi explicado como um efeito inteiramente quântico.

Fios supercondutores podem conduzir correntes enormes por não sofrerem aquecimento devido às colisões entre os elétrons e os átomos. Pode-se criar campos magnéticos muito intensos por meio de eletroímãs supercondutores, mas as aplicações permaneceram limitadas por muitas décadas porque todos os supercondutores conhecidos necessitavam de temperaturas inferiores a 20 K. A situação mudou drasticamente em 1986, com a descoberta dos *supercondutores de altas temperaturas*. Esses materiais cerâmicos são supercondutores a temperaturas tão "altas" quanto 125 K. Embora −150 °C possa não

Os supercondutores possuem propriedades magnéticas incomuns. Aqui, um pequeno ímã permanente flutua sobre um disco feito com o material supercondutor de alta-temperatura $YBa_2Cu_3O_7$, que foi resfriado até a temperatura do nitrogênio líquido.

lhe parecer uma temperatura alta, a tecnologia para obter tais temperaturas é simples e de custo acessível. Portanto, muitas aplicações da supercondutividade estão por vir nos próximos anos.

PARE E PENSE 31.5 Ordene em seqüência decrescente as densidades de corrente de J_a a J_d nestes quatro fios.



31.5 Resistência e lei de Ohm

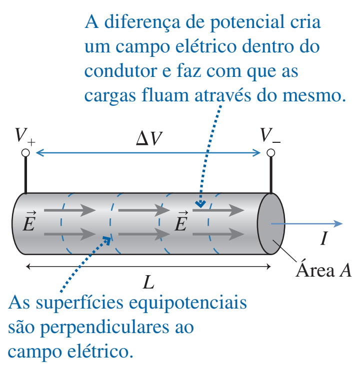


FIGURA 31.19 A corrente I está relacionada à diferença de potencial ΔV.

Vimos que uma corrente é criada por um campo elétrico no interior de um fio ou de um condutor. Por exemplo, a **FIGURA 31.19** mostra uma secção transversal de um condutor no qual um campo elétrico $\vec{E}$ produz uma corrente I ao empurrar os portadores de carga. No Capítulo 30, vimos que um campo elétrico está relacionado a uma diferença de potencial. Além disso, o campo elétrico aponta no sentido em que diminui o potencial e é perpendicular às superfícies equipotenciais. Portanto não deveria ser surpresa que a corrente esteja relacionada a uma diferença de potencial.

Lembre-se de que o componente E_s do campo elétrico está relacionado ao potencial por $E_s = -dV/ds$. Estamos interessados apenas na intensidade de campo elétrico $E = |E_s|$, de modo que o sinal negativo é irrelevante. A intensidade do campo é constante no interior de um condutor cujo diâmetro é constante (uma conseqüência da conservação de corrente); portanto,

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta s} = \frac{\Delta V}{L} \tag{31.20}$$

onde $\Delta V = V_+ - V_-$ é a diferença de potencial entre as extremidades de um condutor de comprimento L. A Equação 31.20 constitui um resultado importante: a intensidade do campo elétrico no interior de um condutor de diâmetro constante – o campo que impulsiona a corrente para adiante – é, simplesmente, a diferença de potencial entre as extremidades do condutor dividida pelo comprimento do mesmo.

Agora podemos usar E para obter a corrente I no condutor. Provamos anteriormente que a densidade de corrente é dada por $J = \sigma E$ e que a corrente em um fio de secção transversal de área A está relacionada à densidade de corrente por $I = J\acute{A}$. Portanto,

$$I = JA = A\sigma E = \frac{A}{\rho}E \tag{31.21}$$

onde $\rho = 1/\sigma$ é a resistividade.

Combinando as Equações 31.20 e 31.21, concluímos que a corrente é dada por

$$I = \frac{A}{\rho L}\Delta V \tag{31.22}$$

Ou seja, **a corrente é proporcional à diferença de potencial entre as extremidades de um condutor**. Podemos reescrever a Equação 31.22 em uma forma mais útil se definirmos a **resistência** de um condutor como

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{31.23}$$

A resistência é uma propriedade particular de cada condutor, pois ela depende do comprimento e do diâmetro do condutor, bem como da resistividade do material do qual ele é feito.

A unidade SI de resistência é o **ohm**, definido como

$$1 \text{ ohm} = 1\ \Omega \equiv 1 \text{ V/A}$$

onde Ω é a letra grega maiúscula ômega. O ohm é a unidade básica de resistência, embora o quilo-ohm ($1\ \text{k}\Omega = 10^3\ \Omega$) e o mega-ohm ($1\ \text{M}\Omega = 10^6\ \Omega$) sejam também amplamente usados. Você pode observar agora, a partir da Equação 31.23, a razão pela qual a resistividade ρ tem por unidade o Ωm, enquanto a unidade de condutividade σ é o $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.

A resistência de um fio ou de um condutor aumenta à medida que seu comprimento aumenta. Isto parece plausível, pois deve ser mais difícil empurrar elétrons através de um fio longo do que através de um fio mais curto. Diminuir a área da secção transversal também aumenta a resistência. De novo, isso parece plausível porque o mesmo campo elétrico pode empurrar mais elétrons em um fio largo do que em um fio fino.

NOTA ► É importante saber distinguir entre resistividade e resistência. A resistividade descreve apenas o material, e não, qualquer pedaço particular do mesmo. A resistência caracteriza um pedaço específico do condutor, dotada de uma geometria específica. A relação entre a resistividade e a resistência é análoga àquela entre a densidade e a massa. ◄

A definição de resistência nos permite escrever a corrente através de um condutor na forma

$$I = \frac{\Delta V}{R} \qquad \text{(lei de Ohm)} \tag{31.24}$$

Em outras palavras, estabelecer uma diferença de potencial ΔV entre as extremidades de um condutor com resistência R cria um campo elétrico que, por sua vez, produz uma corrente $I = \Delta V/R$ através do condutor. Quanto menor for a resistência, maior será a corrente. Essa relação simples entre a diferença de potencial e a corrente é conhecida como **lei de Ohm.**

EXEMPLO 31.8 A corrente em um fio de nicromo

Uma diferença de potencial de 1,5 V é estabelecida através de um fio de nicromo de 200 cm de comprimento e 1,0 mm de diâmetro quando o mesmo é conectado aos terminais de uma bateria de 1,5 V. Quais são o campo elétrico e a corrente no fio?

MODELO A diferença de potencial cria um campo elétrico dentro do fio.

RESOLUÇÃO Conectar o fio à bateria faz com que $\Delta V_{\text{fio}} = \Delta V_{\text{bat}}$. O campo elétrico no interior do fio é

$$E_{\text{fio}} = \frac{\Delta V_{\text{fio}}}{L} = \frac{1{,}5\text{ V}}{2{,}0\text{ m}} = 0{,}75\text{ V/m}$$

A resistência do fio é

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{\pi r^2} = 3{,}8\ \Omega$$

onde usamos a Tabela 31.2 para obter $\rho = 1{,}5 \times 10^{-6}\Omega$ para o nicromo. Portanto, a corrente no fio é

$$I = \frac{\Delta V_{\text{fio}}}{R} = \frac{1{,}5\text{ V}}{3{,}8\ \Omega} = 0{,}39\text{ A}$$

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.