CAPITOLO

13

La corrente elettrica e le leggi di Ohm

Quando premi l'interruttore, nessun elettrone corre dall'interruttore alla lampada: parte il campo, e tutti gli elettroni del filo si mettono in marcia insieme.

OBIETTIVI

1. Definire l'intensità di corrente e l'ampere, distinguere il verso convenzionale della corrente dal moto degli elettroni e spiegare il ruolo del generatore e della forza elettromotrice.
2. Descrivere il modello microscopico della conduzione nei metalli, ricavare $I = neSv_d$ e stimare la velocità di deriva.
3. Applicare la prima legge di Ohm e riconoscere dalla curva caratteristica i conduttori ohmici e non ohmici.
4. Usare la seconda legge di Ohm e la dipendenza della resistività dalla temperatura per calcolare resistenze di fili reali.
5. Ricavare e applicare la potenza elettrica $P = \Delta V \cdot I$ e le sue forme per i conduttori ohmici, anche in kilowattora.
6. Collegare correttamente amperometro e voltmetro e misurare in laboratorio la curva caratteristica di un resistore e di una lampadina.

INDICE DEL CAPITOLO

13.1 La corrente elettrica 2
13.2 Il modello microscopico della conduzione 5
13.3 La prima legge di Ohm 8
13.4 La seconda legge di Ohm e la resistività 11
13.5 La potenza elettrica e l'effetto Joule 14
13.6 Misurare correnti e tensioni 18

Fisica 4 · Parte IV · La corrente elettrica · versione 1.0
Capitolo 13: La corrente elettrica e le leggi di Ohm · pagine 383–410 del volume completo · estratto per lo studio

Premi un interruttore e la stanza si illumina; infili la spina del caricabatterie e il telefono comincia a riempirsi di energia; giri la manopola della stufetta e dopo pochi secondi senti il calore sulle mani. Dietro gesti così ordinari c'è sempre lo stesso fenomeno: cariche elettriche che si muovono in modo ordinato lungo un conduttore, trasportando energia da un generatore fino a un dispositivo che la trasforma in luce, in lavoro meccanico o in calore.

Nella parte precedente hai studiato le cariche in equilibrio: in un conduttore isolato le cariche libere si sistemano in modo che il campo all'interno sia nullo, e lì si fermano. In questo capitolo togliamo il conduttore dall'equilibrio. Collegato a un generatore, il conduttore ospita al suo interno un campo elettrico che non si annulla mai, e le sue cariche libere si mettono in marcia. Definiremo la corrente e la sua unità di misura, costruiremo un modello microscopico del moto degli elettroni in un metallo, ricaveremo le due leggi di Ohm e il legame fra corrente e potenza, e impareremo a misurare correnti e tensioni con gli strumenti del laboratorio.

13.1 La corrente elettrica

13.1.1 Cariche in movimento

Prendi un filo di rame e collega le sue estremità ai due poli di una pila. Fra le estremità c'è ora una differenza di potenziale, e dentro il filo c'è un campo elettrico diretto dal punto a potenziale più alto verso quello a potenziale più basso. Gli elettroni liberi del metallo, che in equilibrio si muovevano a caso senza andare da nessuna parte, sentono la forza del campo e cominciano ad avanzare, tutti insieme, in verso opposto al campo. È nata una **corrente elettrica**: un moto ordinato di cariche elettriche.

Per misurare «quanta» corrente scorre si sceglie una sezione del conduttore e si conta la carica che la attraversa. Se in un intervallo di tempo Δt attraversa la sezione la carica ΔQ, si definisce **intensità di corrente** il rapporto

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

cioè la carica che passa nell'unità di tempo. Spesso si dice semplicemente «la corrente» per indicare la sua intensità. È una grandezza scalare: il verso in cui scorre la corrente si indica a parte, con una freccia sul filo.

L'unità di misura dell'intensità di corrente nel Sistema Internazionale è l'**ampere** (A), una delle sette unità fondamentali, così chiamata in onore di André-Marie Ampère, che incontrerai nella prossima parte del libro. Dal 2019 l'ampere è definito fissando il valore esatto della carica elementare, $e = 1{,}602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C: una corrente di 1 A corrisponde al passaggio, in ogni se-

condo, di $1/(1{,}602\,176\,634 \times 10^{-19}) \approx 6{,}24 \times 10^{18}$ cariche elementari. Di conseguenza il coulomb, che hai usato in tutta la parte precedente, è la carica trasportata in 1 s da una corrente di 1 A:

$$1\ \text{C} = 1\ \text{A} \cdot 1\ \text{s} = 1\ \text{A·s}$$

Le correnti della vita quotidiana vanno da qualche milliampere, come quella che accende un LED ($1\ \text{mA} = 10^{-3}\ \text{A}$), a qualche ampere, come quella di un asciugacapelli o di un caricabatterie rapido. Se un filo è attraversato da una corrente costante di 0,80 A per 5,0 minuti, la carica che passa per una sua sezione è $\Delta Q = I\Delta t = 0{,}80\ \text{A} \times 300\ \text{s} = 240\ \text{C}$, cioè $240\ \text{C}/(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C}) = 1{,}5 \times 10^{21}$ elettroni.

13.1.2 Il verso della corrente

Quando la corrente nacque come concetto, all'inizio dell'Ottocento, nessuno sapeva quali cariche si muovessero davvero nei metalli: l'elettrone fu scoperto solo nel 1897. Si stabilì allora, seguendo la convenzione di Franklin sui segni, che la corrente scorre nel verso in cui si muoverebbero le cariche positive, cioè dal punto a potenziale più alto a quello a potenziale più basso. È il **verso convenzionale della corrente**, e lo useremo sempre: all'esterno del generatore, la corrente va dal polo positivo al polo negativo.

Oggi sappiamo che nei metalli si muovono gli elettroni, che hanno carica negativa e quindi vanno nel verso opposto, dal polo negativo verso il polo positivo (Figura 13.2). Per la corrente le due descrizioni sono equivalenti: una carica negativa che si sposta verso sinistra cambia la distribuzione delle cariche esattamente come una carica positiva uguale che si sposta verso destra. Nelle soluzioni elettrolitiche e nei gas, invece, si muovono contemporaneamente cariche dei due segni, in versi opposti; i loro contributi alla corrente si sommano, perché entrambi trasportano carica positiva nello stesso verso. Le studierai nel prossimo capitolo.

Se l'intensità e il verso della corrente non cambiano nel tempo si parla di **corrente continua**. È la corrente fornita da una pila o dalla batteria di un'automobile, ed è l'unica che studieremo in questo volume; la corrente delle prese di casa, che inverte il suo verso cento volte al secondo, è una corrente alternata, e la incontrerai il prossimo anno.

13.1.3 Il circuito e il generatore

Una corrente stazionaria può scorrere soltanto lungo un percorso chiuso di conduttori, che parte da un polo del generatore e torna all'altro: un **circuito elettrico**. Nella Figura 13.1 il circuito più semplice: un generatore, una lampadina e un interruttore, collegati da fili disegnati con i simboli che si usano negli schemi. Quando l'interruttore è chiuso il percorso è completo e la corrente scorre; quando è aperto il circuito è interrotto, e la corrente si annulla ovunque, non solo nel tratto dell'interruttore.

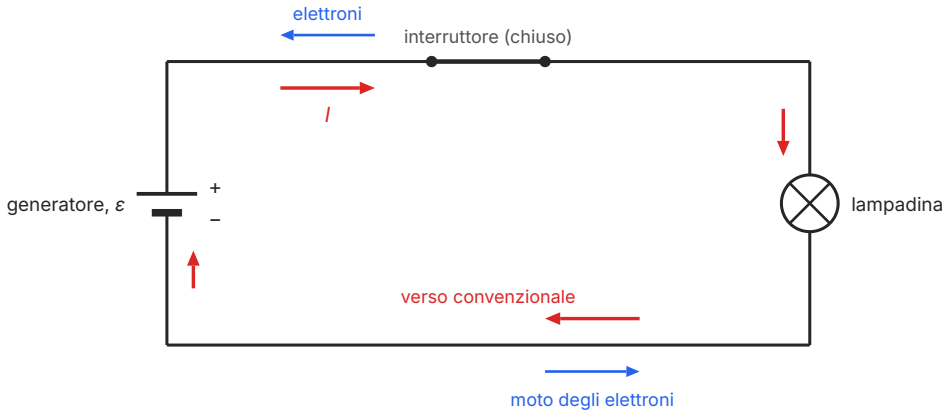


Figura 13.1 Un circuito elementare: un generatore di forza elettromotrice ε, un interruttore chiuso e una lampadina. Nel simbolo del generatore la linea lunga è il polo positivo. Le frecce rosse indicano il verso convenzionale della corrente, che all'esterno del generatore va dal polo positivo al polo negativo e all'interno dal negativo al positivo; le frecce blu il moto degli elettroni, opposto.

Perché serve un generatore? Nel capitolo 11 hai visto che il campo elettrostatico è conservativo: la sua circuitazione lungo qualunque percorso chiuso è nulla. Una carica che percorre un giro completo del circuito spinta solo da forze elettrostatiche riceverebbe dunque un lavoro totale nullo; ma lungo il giro la carica attraversa la lampadina e i fili, dove cede energia agli ioni del conduttore. Senza un'altra fonte di energia la corrente si spegnerebbe in una frazione di secondo, come si scarica un condensatore collegato a una lampadina.

Il **generatore** è il dispositivo che rifornisce di energia le cariche. Al suo interno agiscono forze di natura non elettrostatica, chimiche in una pila, che spingono le cariche positive dal polo negativo al polo positivo, cioè contro il campo elettrico, come una pompa riporta in alto l'acqua che scende lungo un circuito idraulico. Si chiama **forza elettromotrice** (f.e.m.) del generatore il lavoro compiuto da queste forze non elettrostatiche su ogni unità di carica che attraversa il generatore:

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{gen}}}{q}$$

Nonostante il nome, la forza elettromotrice non è una forza ma un lavoro per unità di carica, e si misura in volt (1 V = 1 J/C). Una pila a stilo ha una f.e.m. di 1,5 V, una batteria al litio di un telefono di circa 3,7 V, la batteria di un'automobile di 12 V. In un **generatore ideale**, che è il modello di questo capitolo, la differenza di potenziale fra i poli è sempre uguale alla f.e.m., qualunque corrente eroghi. Un generatore reale, come vedrai nel prossimo capitolo, ha anche una sua resistenza interna, e la tensione ai suoi capi diminuisce quando la corrente aumenta.

APPROFONDIMENTO

Le rane di Galvani e la pila di Volta

Fino alla fine del Settecento l'elettricità era quella delle macchine elettrostatiche e delle bottiglie di Leida: scariche brevissime, non correnti durature. La svolta cominciò a Bologna. Nel 1791 Luigi Galvani, medico e anatomista, pubblicò i risultati di anni di esperimenti sulle zampe di rana: i muscoli si contraevano quando il nervo e il muscolo venivano collegati da un arco fatto di due metalli diversi. Galvani interpretò il fenomeno come una prova dell'esistenza di un'«elettricità animale», prodotta dai tessuti dell'animale stesso.

Alessandro Volta, professore all'Università di Pavia, ripeté gli esperimenti e arrivò a una conclusione diversa: la sorgente dell'elettricità era il contatto fra due metalli diversi, separati da un conduttore umido; la zampa di rana era soltanto un rivelatore molto sensibile. Per dimostrarlo costruì un dispositivo senza alcun tessuto animale: una colonna di dischi di zinco e di rame (o di argento) alternati, separati da dischetti di cartone o di panno imbevuti di acqua salata. La descrisse nel 1800 in una lettera alla Royal Society di Londra. La **pila**, che deve il nome proprio a quella «pila» di dischi, fu il primo generatore capace di mantenere una corrente continua per lungo tempo, e rese possibili tutte le scoperte sull'elettricità del primo Ottocento.

La controversia ebbe un esito curioso: avevano ragione, in parte, tutti e due. Volta aveva ragione sulla sua pila, che funziona grazie alle reazioni chimiche fra i metalli e la soluzione; ma anche i nervi e i muscoli degli animali producono davvero segnali elettrici, come oggi mostrano l'elettrocardiogramma e l'elettroencefalogramma. In onore di Volta l'unità della differenza di potenziale si chiama volt.

13.2 Il modello microscopico della conduzione

13.2.1 Elettroni liberi e urti

Che cosa succede, dentro un metallo, quando scorre una corrente? Il modello più semplice, che spiega già molti fatti, è questo. Un metallo è un reticolo cristallino di ioni positivi, disposti in modo regolare, immerso in un «gas» di elettroni di conduzione: in un filo di rame ogni atomo cede al reticolo uno dei suoi elettroni, che non appartiene più a un atomo particolare ma è libero di muoversi in tutto il metallo. Anche in assenza di corrente questi elettroni non stanno fermi: si muovono in tutte le direzioni con velocità altissime, dell'ordine di 10^6 m/s, urtando continuamente contro gli ioni. Ma i loro moti sono disordinati: per ogni elettrone che attraversa una sezione verso destra, in media ce n'è un altro che la attraversa verso sinistra, e la corrente netta è nulla.

Quando il filo è collegato a un generatore, nel metallo c'è un campo elettrico $\boldsymbol{E}$. Fra un urto e il successivo ogni elettrone subisce la forza $-e\boldsymbol{E}$ e accelera un poco in verso opposto al campo; poi urta uno ione, cambia direzione in modo casuale e cede al reticolo una parte dell'energia

acquistata. Il risultato è un moto a zig-zag, nel quale al moto disordinato si sovrappone un lento avanzamento medio in verso opposto al campo (Figura 13.2). La velocità media di questo avanzamento si chiama **velocità di deriva**, v_d. Gli urti fanno da freno: invece di accelerare per sempre, come farebbero nel vuoto, gli elettroni raggiungono una velocità di deriva costante, che a parità di metallo è proporzionale al campo. È un po' quello che succede a una biglia che rotola giù per un piano inclinato pieno di chiodi: rimbalza di continuo, ma scende con una velocità media costante.

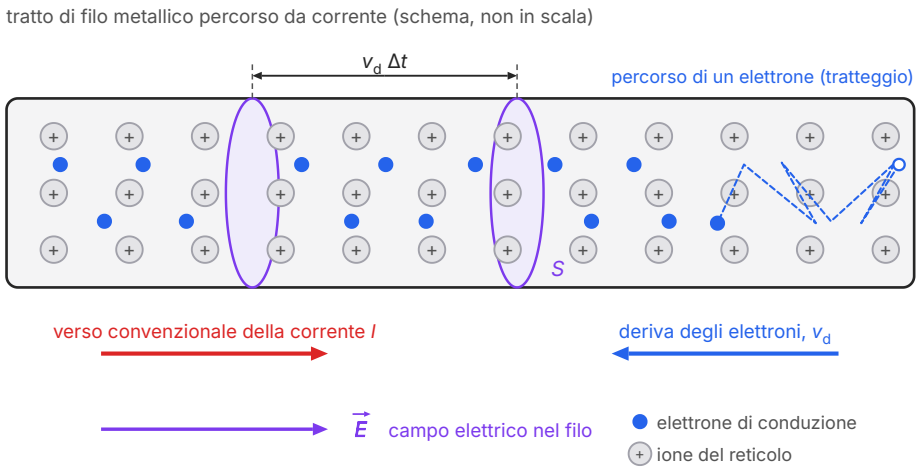


Figura 13.2 Il modello microscopico della conduzione in un metallo. Gli elettroni di conduzione si muovono in modo disordinato fra gli ioni del reticolo; il campo elettrico $\boldsymbol{E}$ sovrappone a questo moto una lenta deriva in verso opposto al campo, mentre il verso convenzionale della corrente è quello del campo. Tutti gli elettroni compresi fra le due sezioni di area S, distanti $v_d\Delta t$, attraversano la sezione di sinistra nel tempo Δt.

13.2.2 Corrente e velocità di deriva

Il modello permette di collegare la corrente, che si misura con uno strumento, a grandezze microscopiche. Considera un filo di sezione S in cui ci sono n elettroni di conduzione per unità di volume (n si misura in m^{-3}), tutti in moto con la velocità di deriva v_d. In un tempo Δt ogni elettrone avanza di $v_d\Delta t$; quindi attraversano una sezione del filo tutti e soli gli elettroni che all'inizio si trovavano entro la distanza $v_d\Delta t$ da essa, cioè nel cilindro di base S e altezza $v_d\Delta t$ della Figura 13.2. Il volume del cilindro è $Sv_d\Delta t$, gli elettroni che contiene sono $nSv_d\Delta t$, e la carica che trasportano, in valore assoluto, è

$$\Delta Q = neSv_d\Delta t$$

Dividendo per Δt si ottiene l'intensità di corrente:

$$I = neSv_d$$

La corrente cresce con il numero di portatori di carica per unità di volume, con la loro carica, con la sezione del filo e con la velocità di deriva. A parità di corrente, in un filo più sottile gli elettroni devono andare più veloci: è la stessa legge della portata di un fluido che hai studiato lo scorso anno (*Fisica 3*, capitolo 11), con la carica al posto della massa.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto vanno veloci gli elettroni in un filo di casa?

Problema. Un filo di rame dell'impianto elettrico di casa ha sezione 1,5 mm^2 ed è percorso da una corrente di 10 A. Il rame ha densità $8{,}96 \times 10^3$ kg/m^3 e massa molare 63,5 g/mol, e ogni suo atomo fornisce un elettrone di conduzione. a) Calcola il numero n di elettroni di conduzione per metro cubo. b) Calcola la velocità di deriva. c) Quanto tempo impiega un elettrone a percorrere 5,0 m di filo?

Passo 1: la densità degli elettroni. In 1 m^3 di rame ci sono $8{,}96 \times 10^3$ kg, cioè (8960 g)/(63,5 g/mol) = 141 mol di atomi. Con un elettrone per atomo: $n = 141\ mol/m^3 \times 6{,}02 \times 10^{23}\ mol^{-1} = 8{,}5 \times 10^{28}\ m^{-3}$.

Passo 2: la velocità di deriva. $S = 1{,}5\ mm^2 = 1{,}5 \times 10^{-6}\ m^2$. Da $I = neSv_d$:

$$v_d = \frac{I}{neS} = \frac{10\ A}{(8{,}5 \times 10^{28}\ m^{-3})(1{,}60 \times 10^{-19}\ C)(1{,}5 \times 10^{-6}\ m^2)} = 4{,}9 \times 10^{-4}\ m/s$$

Passo 3: il tempo. $\Delta t = (5{,}0\ m)/(4{,}9 \times 10^{-4}\ m/s) = 1{,}0 \times 10^4$ s, quasi tre ore.

Commento. Meno di mezzo millimetro al secondo: una lumaca è più veloce. La velocità di deriva è piccolissima perché gli elettroni di conduzione sono tantissimi: in ogni metro di quel filo ce ne sono $nS \times 1\ m = 1{,}3 \times 10^{23}$, con una carica complessiva di circa 2×10^4 C, e basta che avanzino tutti di poco per trasportare una carica grande.

13.2.3 Perché la lampadina si accende subito

Se gli elettroni impiegano ore a percorrere qualche metro, perché la lampadina si accende nell'istante in cui premi l'interruttore? Perché non deve arrivare alla lampadina nessun elettrone partito dall'interruttore. Il filo è già pieno di elettroni di conduzione, dappertutto, anche nel filamento. Chiudendo il circuito si stabilisce in tutto il conduttore il campo elettrico, e il campo si propaga lungo i fili con una velocità che è una frazione importante di quella della luce, centinaia di migliaia di kilometri al secondo. In un tempo brevissimo tutti gli elettroni del circuito, compresi quelli del filamento, cominciano a derivare insieme.

È come aprire il rubinetto di un tubo da giardino già pieno d'acqua: l'acqua esce subito dall'altra estremità, anche se la goccia che è appena entrata dal rubinetto impiegherà parecchio tempo a percorrere il tubo. Quello che viaggia veloce non sono le cariche, ma il segnale, cioè il campo.

ERRORE FREQUENTE

La corrente non si consuma

Molti pensano che una lampadina «consumi» la corrente, e che dal suo secondo morsetto esca meno corrente di quanta ne entra dal primo. Non è così. In un circuito con un solo percorso la corrente è la stessa in ogni sezione: per la conservazione della carica, in condizioni stazionarie la carica che entra ogni secondo in un tratto di filo deve uscirne, altrimenti si accumulerebbe da qualche parte. Un amperometro inserito prima della lampadina e uno inserito dopo segnano lo stesso valore.

Quello che la lampadina trasforma è l'**energia** delle cariche: ogni coulomb che la attraversa scende di potenziale e cede energia al filamento. Gli elettroni escono dalla lampadina numerosi come sono entrati, ma con meno energia potenziale elettrica.

Un secondo errore riguarda il campo. Nel capitolo 12 hai visto che dentro un conduttore il campo elettrico è nullo: vale per un conduttore in **equilibrio elettrostatico**. Dentro un filo percorso da corrente il campo non è nullo, ed è proprio lui a far derivare gli elettroni.

13.3 La prima legge di Ohm

13.3.1 La resistenza elettrica

Collega lo stesso generatore prima a un filo di rame corto e grosso, poi a un sottile filo di nicromo, la lega delle resistenze delle stufette: nel primo caso scorre una corrente molto più intensa. A parità di differenza di potenziale, conduttori diversi lasciano passare correnti diverse, perché oppongono una diversa «resistenza» al moto delle cariche: nel modello microscopico, gli urti degli elettroni con gli ioni sono più o meno frequenti.

Per un conduttore ai cui capi c'è la differenza di potenziale ΔV, e che è percorso dalla corrente I, si definisce **resistenza elettrica** il rapporto

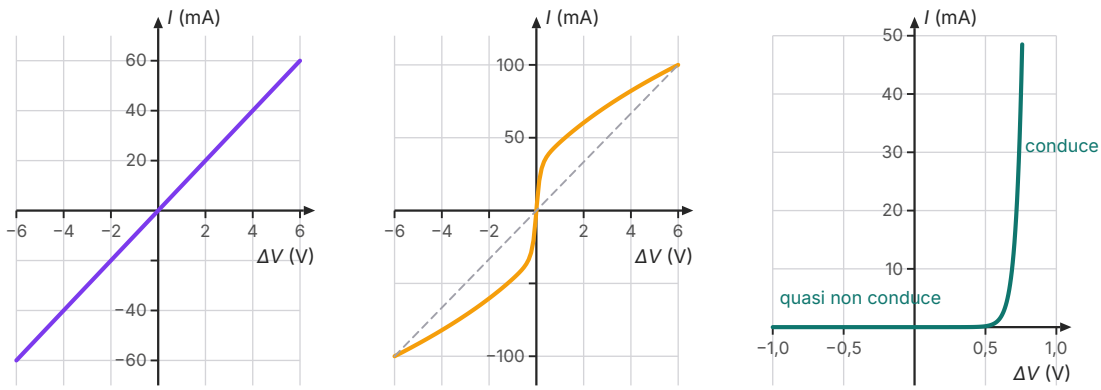
$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

La sua unità di misura è l'**ohm** (Ω): un conduttore ha la resistenza di 1 Ω se, con una differenza di potenziale di 1 V ai suoi capi, è percorso da una corrente di 1 A; quindi 1 Ω = 1 V/A. Si usano spesso i multipli kΩ (10^3 Ω) e MΩ (10^6 Ω). La differenza di potenziale ai capi di un componente si chiama anche, come hai visto nel capitolo 11, tensione: «la tensione della presa è 230 V» significa che fra i suoi due fori c'è una differenza di potenziale di 230 V. Il componente costruito apposta per avere una resistenza ben definita si chiama **resistore**; la parola «resistenza» indica la grandezza fisica, anche se nel linguaggio comune si usa per tutte e due le cose.

13.3.2 Conduttori ohmici

Nel 1827 Georg Simon Ohm, insegnante di matematica e fisica a Colonia, pubblicò il risultato di una lunga serie di misure su fili metallici di lunghezza e spessore diversi. Per ogni filo, se la temperatura restava costante, la corrente era direttamente proporzionale alla differenza di potenziale: raddoppiando la tensione la corrente raddoppiava, triplicandola triplicava. In altre parole, il rapporto $\Delta V/I$ restava costante. È la **prima legge di Ohm**:

$$\Delta V = RI \ (R \text{ costante})$$



a) resistore, R = 100 Ω

b) lampadina a filamento (6 V; 0,1 A)

c) diodo al silicio

Figura 13.3 Curve caratteristiche corrente–tensione. a) Un resistore da 100 Ω: una retta per l'origine di pendenza $1/R$, la stessa nei due versi. b) Una piccola lampadina a filamento da 6 V e 0,1 A (curva tipica): la pendenza diminuisce al crescere della tensione, perché il filamento si scalda e la sua resistenza aumenta; la retta tratteggiata è quella di un resistore da 60 Ω, la resistenza del filamento a 6 V. c) Un diodo al silicio (curva tipica): la corrente è praticamente nulla in un verso e cresce in modo molto rapido nell'altro, oltre circa 0,6 V.

I conduttori che la rispettano si chiamano **conduttori ohmici**. Sono ohmici, con ottima approssimazione, i metalli e le loro leghe a temperatura costante e i resistori dei circuiti elettronici. Il grafico della corrente in funzione della tensione, che si chiama **curva caratteristica** del componente, è per un conduttore ohmico una retta passante per l'origine, e la sua pendenza è $1/R$ (Figura 13.3a). Se si inverte la tensione si inverte anche la corrente, con lo stesso valore: un conduttore ohmico si comporta allo stesso modo nei due versi.

La prima legge di Ohm si usa in tutti e tre i modi in cui si può scrivere. Un resistore da 220 Ω collegato a una batteria da 9,0 V è percorso da $I = \Delta V/R$ = 9,0 V/220 Ω = 41 mA; se nello stesso resistore si misurano 25 mA, ai suoi capi ci sono $\Delta V = RI$ = 220 Ω × 0,025 A = 5,5 V.

13.3.3 Conduttori non ohmici

La legge di Ohm non è una legge universale come la conservazione della carica: è una proprietà di certi materiali, in certe condizioni. Molti componenti hanno curve caratteristiche che non sono rette, e si chiamano **conduttori non ohmici**. Per loro il rapporto $\Delta V/I$ è ancora definito in ogni punto della curva, e si chiama ancora resistenza, ma cambia al variare della tensione.

La Figura 13.3 ne mostra due esempi. Il filamento di tungsteno di una lampadina (b) è un metallo, ma non resta a temperatura costante: più corrente lo attraversa, più si scalda, e un metallo più caldo ha una resistenza maggiore, come vedrai nel prossimo paragrafo. La curva si piega verso l'asse delle tensioni: raddoppiando la tensione la corrente cresce meno del doppio. Il **diodo** (c) è un componente fatto di materiali semiconduttori che lascia passare la corrente in un solo verso: con la tensione applicata nel verso «giusto», oltre circa 0,6 V, la corrente cresce rapidissimamente; nel verso opposto è praticamente nulla. Anche i LED, i diodi che emettono luce, hanno una curva caratteristica di questo tipo.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere la curva caratteristica di una lampadina

Problema. Usa la curva della lampadina della Figura 13.3b. a) Leggi la corrente quando la tensione è 1,0 V e quando è 6,0 V, e calcola la resistenza del filamento nei due casi. b) Se il filamento fosse un conduttore ohmico con la resistenza che ha a 1,0 V, quale corrente lo attraverserebbe a 6,0 V? c) A lampadina spenta, a temperatura ambiente, il multimetro misura sul filamento una resistenza di circa 5 Ω. Che cosa concludi?

Lettura del grafico. A 1,0 V la curva passa per circa 47 mA; a 6,0 V per 100 mA (il punto di funzionamento nominale della lampadina).

Soluzione. a) $R_1 = 1{,}0\ \text{V}/0{,}047\ \text{A} = 21\ \Omega$; $R_6 = 6{,}0\ \text{V}/0{,}100\ \text{A} = 60\ \Omega$. b) Con $R = 1{,}0\ \text{V}/0{,}047\ \text{A}$ costante: $I = 6{,}0\ \text{V} \times (0{,}047\ \text{A}/1{,}0\ \text{V}) = 0{,}28\ \text{A}$, quasi tre volte la corrente vera. c) Da freddo il filamento ha una resistenza circa 12 volte minore di quella che ha alla tensione nominale: la resistenza cresce con la temperatura, e il filamento, che a 6 V è incandescente, è molto più caldo che a 1 V, quando emette appena un debole bagliore.

Commento. La lampadina non segue la prima legge di Ohm, ma la definizione $R = \Delta V/I$ resta valida in ogni punto: semplicemente R dipende dal punto. Per prevedere la corrente di un componente non ohmico serve la sua curva caratteristica, non un solo numero.

Per i componenti non ohmici i costruttori riportano nei fogli tecnici la curva caratteristica, non una resistenza. La forma della curva ha conseguenze pratiche. Un LED non si collega mai direttamente a una pila: oltre la tensione di soglia basta un piccolo aumento di tensione per far crescere la corrente in modo enorme e distruggerlo; per questo gli si mette sempre accanto, sullo stesso filo, un resistore che limita la corrente. Al contrario, il filamento di una lampadina si au-

toregola: se la corrente aumenta, il filamento si scalda, la sua resistenza cresce e frena l'aumento.

13.4 La seconda legge di Ohm e la resistività

13.4.1 Da che cosa dipende la resistenza di un filo

Ohm studiò anche come la resistenza di un filo dipende dalla sua forma. Pensa a un filo come a una successione di tratti uguali messi uno dopo l'altro: la corrente deve attraversarli tutti, e ognuno richiede la sua parte di differenza di potenziale. A parità di corrente, un filo lungo il doppio richiede una tensione doppia: la resistenza è **direttamente proporzionale alla lunghezza** L. Ora pensa a un filo grosso come a tanti fili sottili affiancati, ognuno dei quali porta la sua parte di corrente: a parità di tensione, una sezione doppia lascia passare una corrente doppia, e la resistenza è **inversamente proporzionale all'area della sezione** S. Le misure lo confermano, e mostrano che il resto dipende solo dal materiale e dalla temperatura. È la **seconda legge di Ohm**:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

La costante ρ si chiama **resistività** del materiale. Ricavando $\rho = RS/L$ si vede che si misura in $\Omega\cdot m^2/m = \Omega\cdot m$. La resistenza è una proprietà di un oggetto, la resistività del materiale di cui è fatto: un filo di rame lungo e sottile e una sbarra di rame corta e grossa hanno resistenze diversissime, ma la stessa resistività. Attenzione alle unità: le sezioni dei fili si danno di solito in mm^2, e $1\ mm^2 = 10^{-6}\ m^2$.

Per esempio, un filo di rame lungo 25 m, con un diametro di 0,80 mm, ha sezione $S = \pi(0{,}40 \times 10^{-3}\ m)^2 = 5{,}0 \times 10^{-7}\ m^2$ e resistenza $R = (1{,}68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot m)(25\ m)/(5{,}0 \times 10^{-7}\ m^2) = 0{,}84\ \Omega$.

13.4.2 Conduttori, semiconduttori e isolanti

La resistività cambia moltissimo da un materiale all'altro: fra l'argento e il vetro ci sono da 18 a 22 ordini di grandezza, un intervallo enorme, che non ha l'uguale fra le altre proprietà dei materiali (Tabella 13.1; altri valori nella Tabella A.7 in appendice). I metalli sono i migliori conduttori, con resistività dell'ordine di 10^{-8}–$10^{-6}\ \Omega\cdot m$; gli isolanti, come il vetro, la gomma e le materie plastiche, hanno resistività che superano $10^{10}\ \Omega\cdot m$. Nel mezzo stanno i semiconduttori, come il silicio e il germanio: puri conducono poco, ma la loro resistività si può abbassare di molti ordini di grandezza aggiungendo quantità piccolissime di altri elementi. Su questa proprietà si basano il diodo, il transistor e tutta l'elettronica.

13.4.3 La resistività dipende dalla temperatura

Quando un metallo si scalda, i suoi ioni vibrano più ampiamente attorno alle loro posizioni nel reticolo, e gli elettroni di conduzione li urtano più spesso: la resistività aumenta. Entro intervalli di temperatura non troppo ampi l'aumento è, con buona approssimazione, lineare:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$$

dove ρ_0 è la resistività a una temperatura di riferimento (di solito 20 °C), ΔT la variazione di temperatura rispetto a essa e α il **coefficiente di temperatura** della resistività, che si misura in $\mathrm{K^{-1}}$. Per i metalli puri α è circa $4 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}$: la resistività cresce di circa lo 0,4% per ogni kelvin, cioè del 40% per 100 K. Poiché la lunghezza e la sezione di un filo cambiano pochissimo con la temperatura, la stessa legge vale per la resistenza: $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$. La Figura 13.4 confronta due fili che a 20 °C hanno la stessa resistenza, uno di rame e uno di nicromo: certe leghe, come il nicromo e la costantana, hanno un coefficiente molto più piccolo e si usano quando serve una resistenza quasi indipendente dalla temperatura.

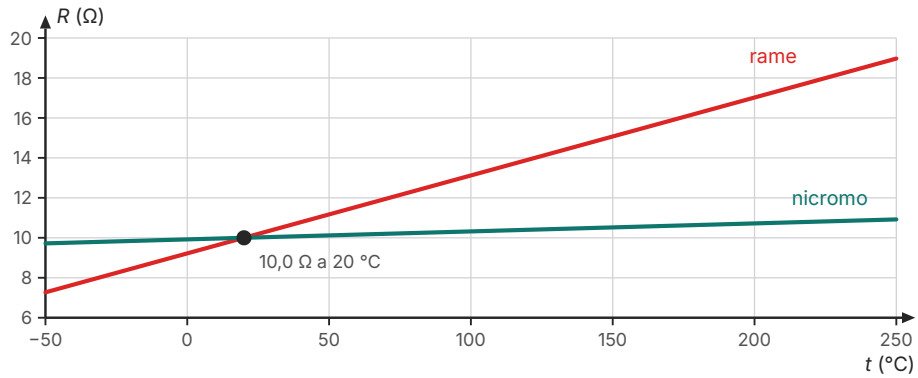


Figura 13.4 Resistenza in funzione della temperatura di due fili che a 20 °C valgono 10,0 Ω, secondo $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$: rame ($\alpha = 3{,}9 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}$) e nicromo ($\alpha = 4 \times 10^{-4}\ \mathrm{K^{-1}}$).

Per i semiconduttori succede il contrario: quando la temperatura aumenta cresce il numero di elettroni liberi di muoversi, e la resistività diminuisce, anche di molto; il loro α è negativo. In ogni caso, la legge lineare è un'approssimazione: il filamento di una lampadina, che passa dalla temperatura ambiente a circa 2500 °C, aumenta la sua resistenza di più di dieci volte, ma non esattamente come prevederebbe la formula.

La legge lineare ha anche usi pratici. Gli avvolgimenti di rame di un motore elettrico si scaldano, ma sono chiusi dove un termometro non arriva: basta misurarne la resistenza a motore freddo e subito dopo averlo spento. Se passa da 2,00 Ω a 2,30 Ω, il rame si è scaldato di $\Delta T = (2{,}30/2{,}00 - 1)/(3{,}9 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}) = 38\ \mathrm{K}$.

COLLEGAMENTI

Termometri che misurano una resistenza

Poiché la resistenza di un metallo cambia in modo regolare con la temperatura, misurare una resistenza è un ottimo modo per misurare una temperatura. Nell'industria si usano i termometri a resistenza di platino: il tipo più diffuso, chiamato Pt100, è un sottile filo o una pellicola di platino che a 0 °C ha la resistenza di 100 Ω e un coefficiente di temperatura di $3{,}85 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}$. Se lo strumento legge 119,25 Ω, la temperatura è $t = (119{,}25/100 - 1)/(3{,}85 \times 10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}) = 50{,}0$ °C. Molti termometri digitali per la febbre usano invece un termistore, un piccolo semiconduttore la cui resistenza diminuisce quando la temperatura sale.

Tabella 13.1 Resistività di alcuni materiali a 20 °C (valori tipici).

Classe	Materiale	ρ (Ω·m)
conduttori metallici	argento	$1{,}59 \times 10^{-8}$
	rame	$1{,}68 \times 10^{-8}$
	alluminio	$2{,}65 \times 10^{-8}$
	nicromo (lega)	circa $1{,}1 \times 10^{-6}$
conduttore elettrolitico	acqua di mare	circa 0,2
semiconduttori (puri)	germanio	circa 0,5
	silicio	circa 2×10^{3}
isolanti	vetro	10^{10}–10^{14}

APPROFONDIMENTO

La superconduttività

A Leida, all'inizio del Novecento, il fisico olandese Heike Kamerlingh Onnes riuscì per primo a liquefare l'elio, e ottenne così temperature di pochi kelvin. Nel 1911, misurando la resistenza di un filo di mercurio, scoprì che verso 4,2 K essa crollava improvvisamente a un valore così piccolo da non essere più misurabile: il mercurio era diventato un **superconduttore**. In un anello superconduttore una corrente, una volta avviata, circola per anni senza generatore.

La temperatura sotto la quale un materiale diventa superconduttore si chiama temperatura critica: per i metalli puri non supera una decina di kelvin, ma negli anni Ottanta del Novecento furono scoperti materiali ceramici che superano i 77 K dell'azoto liquido. Il modello degli elettroni che urtano gli ioni non spiega la superconduttività, che richiede la meccanica quantistica; ma le applicazioni sono già quotidiane: i fili superconduttori producono i campi magnetici intensissimi degli scanner per la risonanza magnetica e degli acceleratori di particelle, come al CERN di Ginevra.

13.5 La potenza elettrica e l'effetto Joule

13.5.1 L'energia trasportata dalla corrente

Una corrente serve quasi sempre a trasportare energia: dalla pila al motorino di un giocattolo, dalla centrale al forno di casa. Quanta energia cede, ogni secondo, una corrente che attraversa un componente? Basta mettere insieme la definizione di corrente e quella di differenza di potenziale del capitolo 11.

ESEMPIO SVOLTO

La potenza assorbita da un componente

Obiettivo. Ricavare la potenza assorbita da un componente qualsiasi ai cui capi c'è la differenza di potenziale ΔV e che è percorso dalla corrente I; poi specializzarla a un conduttore ohmico.

Passo 1: l'energia di una carica. Nel verso convenzionale la carica positiva Δq entra nel componente dal morsetto a potenziale più alto ed esce da quello a potenziale più basso: la sua energia potenziale elettrica diminuisce di $\Delta q \Delta V$ (capitolo 11). Poiché la corrente è stazionaria, l'energia cinetica media delle cariche non cambia: tutta quell'energia viene ceduta al componente.

Passo 2: la potenza. Nel tempo Δt attraversa il componente la carica $\Delta q = I\Delta t$, che cede l'energia $I\Delta t\Delta V$. Dividendo per Δt si ottiene la potenza assorbita:

$$P = \Delta V \cdot I$$

Il risultato vale per qualunque componente, ohmico o no: una lampadina, un motore, un diodo, la batteria di un telefono che si sta caricando. L'unità è quella giusta: 1 V · 1 A = (1 J/C)(1 C/s) = 1 J/s = 1 W.

Passo 3: un conduttore ohmico. Se vale $\Delta V = RI$, sostituendo una volta ΔV e una volta $I = \Delta V/R$:

$$P = RI^2 = \frac{\Delta V^2}{R}$$

Controllo. Un resistore da 100 Ω con 6,0 V ai capi è percorso da 60 mA: $\Delta V \cdot I$ = 6,0 V × 0,060 A = 0,36 W; RI^2 = 100 Ω × (0,060 A)^2 = 0,36 W; $\Delta V^2/R$ = (6,0 V)^2/100 Ω = 0,36 W. Le tre forme danno lo stesso valore, come devono.

Simmetricamente, un generatore ideale che eroga la corrente I fornisce al circuito la potenza εI: le forze non elettrostatiche compiono il lavoro ε su ogni coulomb che lo attraversa, e ogni secondo ne passano I. In un circuito con un generatore ideale e un resistore la potenza fornita dal generatore e quella assorbita dal resistore sono uguali: è la conservazione dell'energia.

13.5.2 L'effetto Joule

In un resistore l'energia ceduta dalle cariche non diventa lavoro meccanico né luce utile: diventa energia interna del conduttore, che si scalda e cede calore all'ambiente. Nel modello microscopico, a ogni urto gli elettroni cedono agli ioni l'energia cinetica acquistata dal campo, e gli ioni vibrano più intensamente. Questa trasformazione di energia elettrica in energia interna si chiama **effetto Joule**, dal nome di James Prescott Joule, che negli anni Quaranta dell'Ottocento misurò il calore prodotto dalle correnti e trovò che è proporzionale a RI^2, prima di dedicarsi al mulinello con cui misurò l'equivalente meccanico del calore (*Fisica 2*, capitolo 12). È il primo

principio della termodinamica (capitolo 1) all'opera: il resistore riceve lavoro elettrico e lo cede come calore.

Su questo effetto funzionano tutti gli apparecchi che servono a scaldare: stufette, bollitori, forni, asciugacapelli, ferri da stiro, tostapane. Il loro «elemento riscaldante» è un filo o un nastro di una lega ad alta resistività, come il nicromo, che resiste all'ossidazione anche quando è rovente. Su questo effetto funziona anche il **fusibile**, un sottile filo metallico inserito nel circuito che fonde e lo interrompe quando la corrente supera un certo valore, prima che si scaldino pericolosamente i fili dell'impianto. Negli impianti di casa i fusibili sono stati sostituiti quasi ovunque da interruttori automatici, che si possono riarmare; li ritroverai nel prossimo capitolo.

Altre volte l'effetto Joule è uno spreco. Nei cavi che portano l'energia elettrica dalle centrali alle città una parte dell'energia si perde come calore. Per trasportare la stessa potenza $P = \Delta V \cdot I$, conviene lavorare con una tensione molto alta e una corrente piccola: le perdite RI^2 diminuiscono con il quadrato della corrente. Per questo le linee di trasmissione lavorano a centinaia di migliaia di volt; come si alza e si abbassa la tensione lo studierai il prossimo anno.

ERRORE FREQUENTE

RI^2 o $\Delta V^2/R$?

Leggendo $P = RI^2$ si direbbe che un resistore più grande dissipa più potenza; leggendo $P = \Delta V^2/R$, che ne dissipa meno. Le due formule sono la stessa, e non si contraddicono: la risposta dipende da quale grandezza resta fissata quando cambia R.

Gli apparecchi di casa sono tutti collegati alla stessa tensione di 230 V: a tensione fissata conta $\Delta V^2/R$, e assorbe più potenza l'apparecchio con la resistenza **minore**. Una stufetta da 2000 W ha una resistenza di $(230\ \text{V})^2/(2000\ \text{W}) = 26\ \Omega$, una lampadina a incandescenza da 60 W di $(230\ \text{V})^2/(60\ \text{W}) = 880\ \Omega$. Se invece due resistori sono percorsi dalla **stessa corrente**, come succede quando sono uno dopo l'altro sullo stesso filo, conta RI^2, e si scalda di più quello con la resistenza maggiore. Nel prossimo capitolo vedrai entrambe le situazioni nei circuiti.

13.5.3 Il kilowattora e la bolletta

Moltiplicando la potenza per il tempo si ottiene l'energia: $E = P\Delta t$. Per l'energia elettrica che si compra, invece del joule, si usa un'unità più grande, il kilowattora (kWh), che hai già incontrato in *Fisica 2*: è l'energia assorbita in un'ora da un apparecchio di potenza 1 kW, cioè $1\ \text{kWh} = (1000\ \text{W})(3600\ \text{s}) = 3{,}6 \times 10^6\ \text{J}$. Il contatore di casa misura proprio i kilowattora.

Un bollitore da 2000 W acceso 3 minuti al giorno per un anno assorbe $2{,}0\ \text{kW} \times (3/60)\ \text{h} \times 365 = 36{,}5\ \text{kWh}$. Con un prezzo, supposto, di 0,25 euro al kilowattora, costa circa 9 euro all'anno. La stessa energia, $1{,}3 \times 10^8\ \text{J}$, basterebbe a sollevare un'automobile di una tonnellata fino a più di 13 km di altezza: l'energia elettrica è un modo molto economico di comprare energia.

ESEMPIO SVOLTO

Una prolunga troppo lunga

Problema. Una stufetta è collegata alla presa con una prolunga lunga 10 m, formata da due fili di rame (andata e ritorno) di sezione 1,5 mm^2. La stufetta assorbe 10 A. a) Calcola la resistenza della prolunga. b) Calcola la tensione che si perde lungo la prolunga. c) Calcola la potenza dissipata nella prolunga, e l'energia dissipata in 2,0 ore.

Soluzione. a) La corrente percorre i due fili, uno dopo l'altro, per una lunghezza complessiva L = 20 m. Per la seconda legge di Ohm:

$$R = \rho \frac{L}{S} = (1{,}68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}) \frac{20\ \text{m}}{1{,}5 \times 10^{-6}\ \text{m}^2} = 0{,}22\ \Omega$$

b) Per la prima legge di Ohm, $\Delta V = RI$ = 0,224 Ω × 10 A = 2,2 V: alla stufetta arrivano circa 228 V invece di 230 V.

c) $P = RI^2$ = 0,224 Ω × (10 A)^2 = 22 W. In 2,0 h = 7200 s: E = 22,4 W × 7200 s = 1,6 × 10^5 J, cioè 0,045 kWh.

Commento. 22 W distribuiti su 20 m di filo scaldano poco la prolunga, se è srotolata. Ma se resta avvolta sul suo rocchetto il calore non riesce a uscire, l'isolante si scalda e può fondere: per questo sulle prolunghe avvolgibili è indicata la potenza massima da usare con il cavo avvolto, molto più bassa di quella con il cavo svolto. Con un filo da 0,75 mm^2 la resistenza e la potenza dissipata raddoppierebbero.

COLLEGAMENTI

Luce a LED e luce a incandescenza

Una lampadina a incandescenza produce luce scaldando il suo filamento di tungsteno a circa 2500 °C: è effetto Joule puro. Ma un corpo a quella temperatura emette soprattutto radiazione infrarossa, invisibile, e oltre il 90% dell'energia elettrica assorbita diventa calore, non luce. Un LED produce luce in un altro modo: nel materiale semiconduttore di cui è fatto gli elettroni cedono energia emettendo direttamente luce visibile, con un riscaldamento molto minore.

Il risultato si legge sulle confezioni: la luce di una vecchia lampadina a incandescenza da 60 W, circa 800 lumen, si ottiene con un LED che assorbe 8–9 W. Una casa che sostituisce dieci lampadine da 60 W, accese in media 3 ore al giorno, con LED da 9 W risparmia ogni giorno 10 × 51 W × 3 h = 1,5 kWh, circa 560 kWh all'anno. Per questo l'Unione europea ha ritirato gradualmente dal mercato le lampadine a incandescenza per uso domestico.

13.6 Misurare correnti e tensioni

13.6.1 L'amperometro e il voltmetro

Per misurare la corrente che attraversa un componente si usa l'**amperometro**, e per misurare la differenza di potenziale ai suoi capi il **voltmetro**. Nei laboratori di scuola sono quasi sempre due funzioni dello stesso strumento, il multimetro digitale, che si sceglie ruotando un selettore e spostando i cavetti nelle boccole giuste. Il modo in cui si collegano al circuito discende direttamente da che cosa misurano (Figura 13.5).

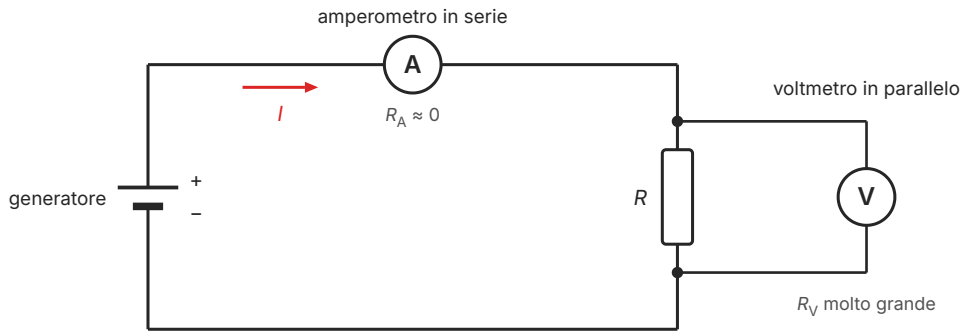


Figura 13.5 Come si collegano gli strumenti per misurare la corrente in un resistore e la tensione ai suoi capi. L'amperometro (A) è in serie, sullo stesso percorso della corrente; il voltmetro (V) è in parallelo, collegato ai due morsetti del resistore. Un amperometro ideale ha resistenza interna nulla, un voltmetro ideale resistenza interna infinita.

- L'amperometro deve essere attraversato dalla corrente che misura: si collega **in serie** al componente, cioè si apre il circuito e lo si richiude attraverso lo strumento, in modo che la corrente non abbia altra strada.
- Il voltmetro deve «sentire» il potenziale ai due capi del componente: si collega **in parallelo**, con i suoi due puntali toccati sui due morsetti del componente, senza aprire il circuito.

13.6.2 Gli strumenti ideali

Uno strumento di misura non dovrebbe cambiare la grandezza che misura. Un amperometro inserito in serie aggiunge la sua resistenza interna R_A a quella del circuito, e quindi riduce un poco la corrente: per disturbare il meno possibile deve avere una resistenza interna piccolissima. L'**amperometro ideale** ha $R_A = 0$, e la tensione ai suoi capi è nulla. Un voltmetro collegato in parallelo offre alla corrente una seconda strada, e ne devia una parte: per disturbare il meno

possibile deve avere una resistenza interna grandissima. Il **voltmetro ideale** ha R_V infinita e non è attraversato da corrente.

Gli strumenti reali si avvicinano molto a questi modelli: un multimetro digitale usato come voltmetro ha di solito una resistenza interna di circa 10 MΩ, del tutto trascurabile rispetto ai resistori da qualche centinaio di ohm dei circuiti di laboratorio; usato come amperometro, una resistenza interna che va da qualche centesimo di ohm sulle portate più alte (10 A) a qualche ohm o qualche decina di ohm su quelle in milliampere. Nel prossimo capitolo vedrai come si costruiscono questi strumenti e quanto disturbano un circuito.

Un multimetro ha diverse **portate** per ogni grandezza: per esempio 200 mV, 2 V, 20 V e 200 V come voltmetro. La portata è il valore massimo che lo strumento può misurare in quella posizione del selettore, e fissa anche la sua risoluzione: sulla portata 20 V un comune multimetro a «tre cifre e mezzo» (lettura massima 1999) legge al centesimo di volt, sulla portata 2 V al millesimo. Quando non sai che valore aspettarti, comincia dalla portata più alta e scendi finché la lettura non è la più precisa possibile senza superare il fondo scala; se lo superi, il display segnala il «fuori scala», di solito con la cifra 1 isolata o con la scritta OL. L'incertezza di una misura digitale non è soltanto l'ultima cifra: il costruttore la dichiara come una percentuale della lettura più qualche unità dell'ultima cifra, e va riportata nella relazione.

Scambiare i collegamenti è un errore classico, ed è più grave in un verso che nell'altro. Un voltmetro messo in serie, con la sua resistenza enorme, praticamente interrompe il circuito: la corrente si annulla e lo strumento segna la tensione del generatore, ma niente si guasta. Un amperometro messo in parallelo a un componente, invece, offre alla corrente una strada di resistenza quasi nulla: è un cortocircuito, la corrente nello strumento diventa intensissima e brucia il fusibile che lo protegge, o lo strumento stesso. Molti multimetri hanno anche la funzione di ohmmetro, che misura la resistenza di un componente facendogli attraversare una piccola corrente nota: si usa soltanto su un componente scollegato dal circuito.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: le curve caratteristiche di un resistore e di una lampadina

Materiali. Un alimentatore da banco a bassa tensione continua, regolabile fra 0 e 12 V; un resistore con le bande colorate marrone, nero, marrone, oro, cioè 100 Ω con tolleranza del 5%, da 1 W; una piccola lampadina a filamento da 6 V e 0,1 A con il suo portalampada; due multimetri digitali; cavetti con morsetti a coccodrillo.

Procedimento. 1) Monta il circuito della Figura 13.5 con il resistore: un multimetro come amperometro in serie (portata 200 mA), l'altro come voltmetro in parallelo al resistore. 2) Partendo da zero, regola l'alimentatore in modo che il voltmetro segni 0,50 V, 1,00 V, 2,00 V e così via fino a 6,00 V, e annota ogni volta la corrente. 3) Sostituisci il resistore con la lampadina e ripeti le misure, aspettando a ogni passo che la lettura dell'amperometro si stabilizzi: il filamento impiega qualche secondo a raggiungere la sua temperatura. 4) Scollega la lampadina e misurane la resistenza a freddo con il multimetro usato come ohmmetro. Le incertezze sono quelle di lettura degli strumenti: ±0,01 V sulle tensioni, ±0,2 mA sulle correnti del resistore e ±1 mA su quelle della lampadina.

Tabella 13.2 Tensione e corrente per il resistore e per la lampadina, e resistenza della lampadina calcolata come $\Delta V/I$ (dati tipici di una prova).

ΔV (V)	I resistore (mA)	I lampadina (mA)	R lampadina (Ω)
0,50	5,0	38	13
1,00	10,1	47	21
2,00	20,2	60	33
3,00	30,6	72	42
4,00	40,6	82	49
5,00	50,7	91	55
6,00	60,8	100	60,0

Analisi. Riporta i dati in un grafico con la corrente in ascissa e la tensione in ordinata (Figura 13.6): così la pendenza di una retta per l'origine è proprio $R = \Delta V/I$. I punti del resistore sono allineati su una retta che passa per l'origine. Per stimarne la pendenza con la sua incertezza usa il metodo delle rette di massima e minima pendenza compatibili con le barre d'errore del secondo e dell'ultimo punto: si ottiene $R_{max} = 99{,}8\ \Omega$ e $R_{min} = 97{,}5\ \Omega$, quindi $R = (98{,}6 \pm 1{,}2)\ \Omega$. I punti della lampadina, invece, stanno su una curva la cui pendenza cresce con la corrente: la resistenza del filamento passa da 13 Ω a 0,50 V a 60,0 Ω a 6,00 V, e da fredda l'ohmmetro misura circa 5 Ω.

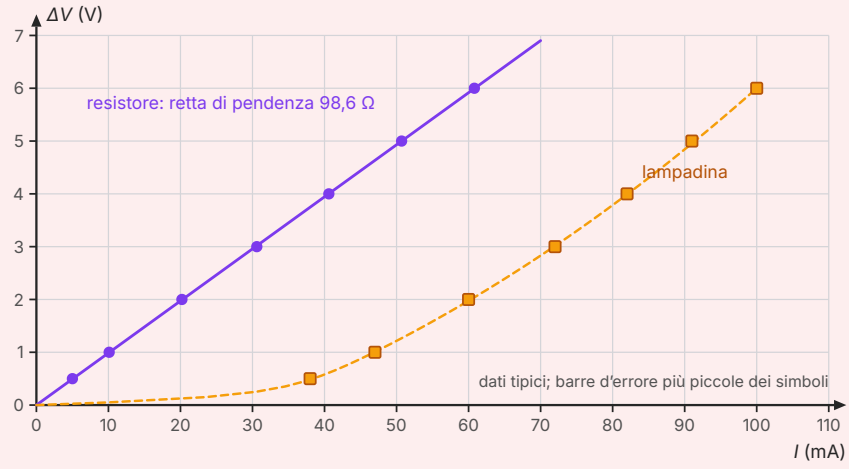


Figura 13.6 I dati della Tabella 13.2 nel piano corrente–tensione. I punti del resistore stanno su una retta per l'origine di pendenza 98,6 Ω; quelli della lampadina su una curva sempre più ripida, perché la resistenza del filamento cresce con la temperatura (la linea tratteggiata segue l'andamento dei punti).

Confronto teoria–esperimento. Il codice dei colori dichiara per il resistore (100 ± 5) Ω. La differenza fra il valore nominale e quello misurato è 100 Ω − 98,6 Ω = 1,4 Ω, minore della somma delle incertezze, 5 Ω + 1,2 Ω = 6,2 Ω: i due valori sono **compatibili**. La misura è anche più precisa dell'indicazione del costruttore, che garantisce soltanto che la resistenza stia fra 95 Ω e 105 Ω. Per la lampadina, i dati nominali (6 V; 0,1 A) prevedono a 6 V una resistenza di 60 Ω; la misura dà 6,00 V/(0,100 ± 0,001) A = (60,0 ± 0,7) Ω, in pieno accordo.

Che cosa concludere. Il resistore è un conduttore ohmico: nell'intervallo esplorato la sua resistenza non dipende dalla tensione, entro l'incertezza. La lampadina non lo è: la sua resistenza cresce di circa cinque volte fra 0,5 V e 6 V e di circa dodici volte rispetto al valore a freddo, perché il filamento si scalda. La legge di Ohm non è violata dal tungsteno, che a temperatura costante è ohmico: è la temperatura del filamento che cambia da un punto all'altro della curva.

Sicurezza. Usa soltanto l'alimentatore a bassa tensione, mai la rete a 230 V. Non superare la potenza massima del resistore: a 6 V dissipa 0,36 W, ben sotto 1 W, ma a 12 V dissiperebbe 1,4 W e si scalderebbe troppo. Il bulbo della lampadina diventa caldo: non toccarlo subito dopo la prova. Non collegare mai l'amperometro in parallelo a un componente.

Per la relazione. Riporta lo schema del circuito, la tabella e il grafico. Calcola $R = \Delta V/I$ per ogni punto del resistore e verifica che i valori sono compatibili fra loro. Discuti se la resistenza interna del voltmetro (10 MΩ) e quella dell'amperometro possono aver alterato le misure. Spiega perché la curva della lampadina ha la forma osservata, e prevedi come cambierebbe se la lampadina fosse immersa in un bicchiere d'acqua fredda.

IN SINTESI

Le formule del capitolo

$I = \Delta Q/\Delta t$ — intensità di corrente: la carica che attraversa una sezione del conduttore nell'unità di tempo; si misura in ampere, 1 A = 1 C/s. Il verso convenzionale è quello in cui si muoverebbero le cariche positive.

$\varepsilon = W_{gen}/q$ — forza elettromotrice: il lavoro delle forze non elettrostatiche del generatore per unità di carica; si misura in volt. In un generatore ideale è uguale alla tensione fra i poli.

$I = neSv_d$ — la corrente in un metallo, con n elettroni di conduzione per metro cubo che derivano con velocità v_d in un filo di sezione S.

$R = \Delta V/I$ — definizione di resistenza, in ohm (1 Ω = 1 V/A); vale per ogni componente. **Prima legge di Ohm**, $\Delta V = RI$ con R costante: vale soltanto per i conduttori ohmici, come i metalli a temperatura costante.

$R = \rho L/S$ — **seconda legge di Ohm**, per un filo di lunghezza L e sezione S costante; la resistività ρ, in Ω·m, dipende dal materiale e dalla temperatura.

$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$ — dipendenza dalla temperatura, approssimazione lineare valida per i metalli in intervalli non troppo ampi; α è positivo per i metalli, negativo per i semiconduttori.

$P = \Delta V \cdot I$ — potenza assorbita da qualunque componente, in watt; per un conduttore ohmico $P = RI^2 = \Delta V^2/R$, tutta trasformata in energia interna (effetto Joule). 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J.

Amperometro in serie, idealmente $R_A = 0$; voltmetro in parallelo, idealmente R_V infinita.

SINTESI

- La corrente è un moto ordinato di cariche; la sua intensità $I = \Delta Q/\Delta t$ si misura in ampere, unità fondamentale del SI: 1 C = 1 A·s.
- Il verso convenzionale della corrente è quello delle cariche positive, dal polo positivo al negativo all'esterno del generatore; nei metalli gli elettroni vanno in verso opposto.
- Una corrente stazionaria richiede un circuito chiuso e un generatore, la cui forza elettromotrice ε è il lavoro per unità di carica delle forze non elettrostatiche.
- Nei metalli gli elettroni di conduzione derivano lentissimamente (circa 10^{-4} m/s): $I = neSv_d$. La lampadina si accende subito perché si propaga il campo, non gli elettroni.
- La corrente non si consuma: in un circuito con un solo percorso è la stessa in ogni sezione; il componente trasforma l'energia delle cariche.
- La resistenza è $R = \Delta V/I$, in ohm. Nei conduttori ohmici è costante (prima legge di Ohm); lampadine e diodi non sono ohmici.
- Seconda legge di Ohm: $R = \rho L/S$. La resistività distingue conduttori, semiconduttori e isolanti.
- La resistività dei metalli cresce con la temperatura, $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$; quella dei semiconduttori diminuisce; i superconduttori hanno resistenza nulla sotto la temperatura critica.
- La potenza assorbita è $P = \Delta V \cdot I$; per un conduttore ohmico $P = RI^2 = \Delta V^2/R$, trasformata in energia interna (effetto Joule). 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J.
- L'amperometro va in serie e idealmente ha resistenza nulla; il voltmetro va in parallelo e idealmente ha resistenza infinita.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Una corrente di 1 A corrisponde a:
   - **A.** 1 elettrone che attraversa una sezione del conduttore in 1 s
   - **B.** 1 C di carica che attraversa una sezione del conduttore in 1 s
   - **C.** 1 J di energia per ogni coulomb di carica
   - **D.** 1 C di carica accumulata nel conduttore

2. ● In un filo metallico percorso da corrente, il verso convenzionale della corrente:
   - **A.** coincide con il verso in cui si muovono gli elettroni
   - **B.** va sempre dal polo negativo al polo positivo, anche dentro il generatore
   - **C.** dipende dalla sezione del filo
   - **D.** è opposto al verso in cui si muovono gli elettroni

3. ● La forza elettromotrice di un generatore è:
   A. il lavoro compiuto dalle forze non elettrostatiche del generatore su ogni unità di carica che lo attraversa
   B. la forza con cui il generatore spinge gli elettroni, misurata in newton
   C. la corrente massima che il generatore può erogare
   D. la potenza fornita dal generatore al circuito

4. ● Un conduttore si dice ohmico se:
   A. la sua resistenza è nulla
   B. la corrente che lo attraversa è indipendente dalla tensione
   C. a temperatura costante il rapporto $\Delta V/I$ non cambia al variare della tensione
   D. lascia passare la corrente in un solo verso

5. ●● Un filo metallico viene sostituito da un filo dello stesso materiale lungo il doppio e con diametro dimezzato. La sua resistenza:
   A. raddoppia
   B. diventa 8 volte più grande
   C. quadruplica
   D. resta la stessa

6. ●● Quando la temperatura di un filo di rame aumenta, la sua resistenza:
   A. aumenta, perché gli elettroni urtano più spesso gli ioni che vibrano
   B. diminuisce, perché gli elettroni si muovono più velocemente
   C. non cambia, perché la resistività è una costante del materiale
   D. si annulla sopra la temperatura critica

7. ●● Un asciugacapelli da 2000 W funziona alla tensione di 230 V. La corrente che lo attraversa è circa:
   A. 0,12 A
   B. 115 A
   C. $4{,}6 \times 10^5$ A
   D. 8,7 A

8. ●● Per misurare la corrente in un resistore si usa un amperometro, che va collegato:
   A. in parallelo al resistore, e idealmente ha resistenza interna infinita
   B. in parallelo al resistore, e idealmente ha resistenza interna nulla
   C. in serie al resistore, e idealmente ha resistenza interna nulla
   D. in serie al resistore, e idealmente ha resistenza interna infinita

9. ●● In un filo di rame percorso da una corrente di qualche ampere, la velocità di deriva degli elettroni è dell'ordine di:
   A. 10^{8} m/s
   B. 10^{6} m/s
   C. 10^{-4} m/s
   D. 10^{-12} m/s

Vero o falso

10. ● In un circuito con una lampadina, la corrente che esce dalla lampadina è minore di quella che vi entra, perché una parte viene consumata. V / F

11. ● Il kilowattora è un'unità di misura dell'energia. V / F

12. ●● Per un conduttore non ohmico la resistenza $R = \Delta V/I$ non è definita. V / F

13. ●● Quando si chiude l'interruttore la lampadina si accende quasi subito perché gli elettroni percorrono il filo quasi alla velocità della luce. V / F

14. ●● Due apparecchi sono collegati alla stessa presa a 230 V: assorbe più potenza quello che ha la resistenza minore. V / F

Applicare

15. ● Attraverso una sezione di un filo passano 4,5 C in 3,0 s. Calcola l'intensità di corrente e il numero di elettroni che attraversano la sezione in ogni secondo.

16. ● Un resistore da 330 Ω è collegato a una batteria ideale da 4,5 V. Calcola la corrente che lo attraversa.

17. ● Una lampadina a LED da 9,0 W resta accesa 5,0 ore al giorno per 30 giorni. Calcola l'energia assorbita in kilowattora e in joule.

18. ●● Calcola la resistenza di un filo di rame lungo 15 m con un diametro di 0,50 mm (resistività nella Tabella 13.1).

19. ●● Usa la Figura 13.4. A quale temperatura il filo di rame ha una resistenza di 13,9 Ω? Quanto vale, alla stessa temperatura, la resistenza del filo di nicromo? Verifica le letture con la formula $R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$.

20. ●● Una stufetta ha la potenza di 1500 W alla tensione di 230 V. Calcola la corrente che assorbe e la resistenza del suo elemento riscaldante in funzionamento.

21. ●● Un termometro a resistenza di platino Pt100 ha la resistenza di 100,00 Ω a 0 °C e il coefficiente di temperatura $3{,}85 \times 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$. Lo strumento misura 127,72 Ω: quale temperatura indica?

22. ● Completa: l'amperometro si collega _____ al componente e idealmente ha resistenza interna _____ ; il voltmetro si collega _____ e idealmente ha resistenza interna _____ .

23. ●● Su un resistore da 47 Ω è indicata la potenza massima di 0,25 W. Calcola la corrente massima che può attraversarlo e la tensione massima che si può applicare ai suoi capi.

Problemi

24. ●●● Una linea elettrica è formata da un cavo di alluminio lungo 2,0 km con diametro 1,2 cm, percorso da una corrente di 150 A (resistività di alluminio e rame nella Tabella 13.1). a) Calcola la resistenza del cavo. b) Calcola la differenza di potenziale fra i suoi estremi e la potenza dissipata per effetto Joule. c) Quale diametro dovrebbe avere un cavo di rame della stessa lunghezza per avere la stessa resistenza?

25. ●●● Un bollitore elettrico da 2,0 kW, alimentato a 230 V, contiene 1,5 L d'acqua a 18 °C. a) Calcola la corrente che assorbe e la resistenza del suo elemento riscaldante. b) Quanto tempo servirebbe per portare l'acqua a 100 °C se tutta l'energia elettrica diventasse energia interna dell'acqua? c) In realtà servono 5,0 minuti: quale frazione dell'energia elettrica scalda l'acqua?

26. ●●● Un filo di alluminio con sezione 2,5 mm^2 è percorso da una corrente di 4,0 A (resistività nella Tabella 13.1). Ogni atomo di alluminio fornisce 3 elettroni di conduzione; l'alluminio ha densità $2{,}70 \times 10^3$ kg/m^3 e massa molare 26,98 g/mol. a) Calcola il numero di elettroni di conduzione per metro cubo. b) Calcola la velocità di deriva. c) Il campo elettrico dentro il filo è uguale al rapporto fra la tensione ai capi di un tratto di filo e la sua lunghezza. Calcolalo, e spiega perché questo risultato non contraddice ciò che hai studiato sui conduttori in equilibrio.

27. ●● Un condensatore da 2,2 mF viene caricato con una batteria da 9,0 V e poi scollegato e chiuso su un resistore, nel quale si scarica in pratica del tutto in circa 0,10 s. a) Calcola la carica e l'energia immagazzinate nel condensatore. b) Calcola la corrente media durante la scarica. c) Quanta energia si trasforma in energia interna del resistore? Quanto vale la potenza media dissipata?

28. ●●● In un tubo a raggi catodici gli elettroni partono quasi fermi, vengono accelerati da una differenza di potenziale di 2,0 kV e colpiscono lo schermo formando un fascio di corrente 0,50 mA. a) Quanti elettroni colpiscono lo schermo ogni secondo? b) Calcola l'energia cinetica di ogni elettrone, in elettronvolt e in joule, e la sua velocità. c) Quale potenza trasporta il fascio fino allo schermo? d) Quanta carica arriva sullo schermo in un minuto?

29. ●●● Una stufetta deve dissipare 1000 W alla tensione di 230 V. Il suo elemento riscaldante è un filo di nicromo ($\rho = 1{,}1 \times 10^{-6}$ Ω·m a 20 °C, $\alpha = 4{,}0 \times 10^{-4}$ K^{-1}) con diametro 0,50 mm, che in funzionamento raggiunge 520 °C. a) Calcola la resistenza del filo in funzionamento. b) Calcola la sua resistenza a 20 °C. c) Quanto deve essere lungo il filo? d) Calcola la corrente e la potenza nell'istante in cui la stufetta, fredda, viene accesa.

30. ●● Per due componenti X e Y si misurano le seguenti coppie tensione–corrente. X: 1,0 V e 20 mA; 2,0 V e 40 mA; 3,0 V e 61 mA; 4,0 V e 80 mA. Y: 1,0 V e 20 mA; 2,0 V e 32 mA; 3,0 V e 41 mA; 4,0 V e 48 mA. a) Calcola $\Delta V/I$ per ogni misura. b) Quale dei due componenti è ohmico? Quanto vale la sua resistenza? c) Che cosa potrebbe essere l'altro?

31. ●●● Uno scaldabagno elettrico da 1200 W, alimentato a 230 V, scalda 80 L d'acqua da 15 °C a 55 °C; il 90% dell'energia elettrica che assorbe va all'acqua. a) Calcola il calore assorbito dall'acqua, in joule e in kilowattora. b) Calcola l'energia elettrica assorbita e il tempo necessario. c) Calcola la corrente assorbita. d) Con un prezzo di 0,25 euro al kilowattora, quanto costa un riscaldamento?

Ragionare e argomentare

32. ●● Un uccello sta appoggiato su un cavo di alluminio di una linea elettrica, con le zampe a 5 cm di distanza. Il cavo ha diametro 1,2 cm ed è percorso da 500 A (resistività nella Tabella 13.1). Stima la differenza di potenziale fra le due zampe e spiega perché l'uccello non corre pericoli. Che cosa succederebbe se toccasse contemporaneamente due cavi?

33. ● Uno studente calcola la resistenza di un filo di rame lungo 10 m con sezione 1 mm^2 così: $R = (1{,}68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot m)(10\ m)/(1 \times 10^{-3}\ m^2) = 1{,}68 \times 10^{-4}\ \Omega$. Trova l'errore e correggi il risultato.

34. ●●● Progetta un esperimento per misurare la resistività del materiale di un filo metallico sottile avendo a disposizione un alimentatore a bassa tensione, un amperometro, un voltmetro, un metro e un micrometro. Spiega quali grandezze misureresti, quale grafico costruiresti e come ne ricaveresti ρ.

35. ●●● Le lampadine a incandescenza si bruciano quasi sempre nell'istante in cui vengono accese. Spiega perché, usando i dati di una lampadina da 60 W per 230 V la cui resistenza a freddo è 65 Ω: calcola la resistenza in funzionamento, la corrente e la potenza nel primo istante dopo l'accensione, e confrontale con quelle a regime.

PER APPROFONDIRE

- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: il capitolo sulla conduzione e le correnti nei conduttori, con il bilancio fra la forza del campo e gli urti che porta alla legge di Ohm.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo su corrente e resistenza, con molti esempi numerici sulla velocità di deriva, la resistività e la potenza.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo sulla corrente elettrica, che spiega a parole perché la lampadina si accende subito e che cosa si paga davvero nella bolletta.
- [FAR] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*: le prime serie dimostrano che l'elettricità delle pile, delle macchine elettrostatiche e degli animali è una sola; una lettura storica impegnativa ma accessibile a tratti.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sui fluidi elettrici e sulla corrente raccontano come è cambiata l'idea di corrente, dal fluido al campo.

Glossario del capitolo

Ampere
Unità fondamentale del SI dell'intensità di corrente: 1 A = 1 C/s. È definita fissando il valore esatto della carica elementare.

Amperometro
Strumento che misura l'intensità di corrente; si collega in serie e idealmente ha resistenza interna nulla.

Circuito elettrico
Percorso chiuso di conduttori, collegato a un generatore, lungo il quale può scorrere una corrente.

Coefficiente di temperatura
Il coefficiente α della legge $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$; è positivo per i metalli e negativo per i semiconduttori.

Corrente continua
Corrente la cui intensità e il cui verso non cambiano nel tempo.

Corrente elettrica
Moto ordinato di cariche elettriche in un conduttore.

Curva caratteristica
Il grafico della corrente che attraversa un componente in funzione della tensione ai suoi capi.

Diodo
Componente a semiconduttore che lascia passare la corrente in un solo verso; è un conduttore non ohmico.

Effetto Joule
La trasformazione in energia interna, e quindi in calore, dell'energia ceduta dalla corrente a un conduttore; la potenza è RI^2.

Forza elettromotrice
Il lavoro compiuto dalle forze non elettrostatiche di un generatore su ogni unità di carica che lo attraversa; si misura in volt.

Intensità di corrente
La carica che attraversa una sezione di un conduttore nell'unità di tempo, $I = \Delta Q/\Delta t$; si misura in ampere.

Ohm
Unità della resistenza elettrica: 1 Ω = 1 V/A.

Prima legge di Ohm
Nei conduttori ohmici, a temperatura costante, la tensione è direttamente proporzionale alla corrente: $\Delta V = RI$ con R costante.

Resistenza elettrica
Il rapporto $R = \Delta V/I$ fra la tensione ai capi di un conduttore e la corrente che lo attraversa; si misura in ohm.

Resistività
Grandezza caratteristica di un materiale, a una data temperatura, che ne misura l'opposizione al passaggio della corrente; si misura in Ω·m.

Seconda legge di Ohm
La resistenza di un filo è $R = \rho L/S$: proporzionale alla lunghezza, inversamente proporzionale alla sezione.

Superconduttore
Materiale la cui resistenza si annulla al di sotto di una temperatura critica.

Velocità di deriva
La velocità media con cui gli elettroni di conduzione avanzano in un conduttore percorso da corrente, sovrapposta al loro moto disordinato.

Verso convenzionale della corrente
Il verso in cui si muoverebbero le cariche positive: all'esterno del generatore, dal polo positivo al polo negativo.

Voltmetro
Strumento che misura la differenza di potenziale; si collega in parallelo e idealmente ha resistenza interna infinita.

Soluzioni

1. B. Per definizione $I = \Delta Q/\Delta t$: 1 A = 1 C/s. Un elettrone al secondo sarebbe una corrente di $1{,}60 \times 10^{-19}$ A.

2. D. Il verso convenzionale è quello delle cariche positive; gli elettroni, negativi, si muovono in verso opposto. Dentro il generatore la corrente va dal polo negativo al positivo.

3. A. $\varepsilon = W_{\text{gen}}/q$, in J/C = V: nonostante il nome non è una forza.

4. C. È la prima legge di Ohm: $\Delta V = RI$ con R costante. La D descrive un diodo, che non è ohmico.

5. B. $R = \rho L/S$: L raddoppia; dimezzando il diametro la sezione diventa 1/4. Quindi R è moltiplicata per $2 \times 4 = 8$.

6. A. Per un metallo $\alpha > 0$: gli ioni vibrano più ampiamente e gli urti sono più frequenti. La D riguarda i superconduttori, che diventano tali raffreddandosi.

7. D. $I = P/\Delta V = 2000$ W/230 V = 8,7 A.

8. C. L'amperometro deve essere attraversato dalla stessa corrente del resistore (in serie) e non deve ridurla (resistenza interna nulla).

9. C. Per esempio 10 A in un filo da 1,5 mm^2 danno $v_{\text{d}} = 4{,}9 \times 10^{-4}$ m/s. 10^6 m/s è l'ordine di grandezza della velocità del moto disordinato degli elettroni.

10. F. In un circuito con un solo percorso la corrente è la stessa in ogni sezione (conservazione della carica); la lampadina trasforma l'energia delle cariche, non la carica.

11. V. 1 kWh = (1000 W)(3600 s) = $3{,}6 \times 10^6$ J.

12. F. $R = \Delta V/I$ è sempre definita; per un conduttore non ohmico cambia da un punto all'altro della curva caratteristica.

13. F. Gli elettroni derivano lentissimamente (circa 10^{-4} m/s); è il campo elettrico a stabilirsi rapidamente in tutto il circuito, mettendo in moto insieme tutti gli elettroni.

14. V. A tensione fissata $P = \Delta V^2/R$: minore è R, maggiore è la potenza.

15. $I = \Delta Q/\Delta t = 4{,}5$ C/3,0 s = 1,5 A. Elettroni al secondo: (1,5 C/s)/($1{,}60 \times 10^{-19}$ C) = $9{,}4 \times 10^{18}$.

16. $I = \Delta V/R = 4{,}5$ V/330 Ω = $1{,}4 \times 10^{-2}$ A = 14 mA.

17. $E = P\Delta t = 0{,}0090$ kW × (5,0 h × 30) = 1,35 kWh ≈ 1,4 kWh; in joule $1{,}35 \times 3{,}6 \times 10^6$ J = $4{,}9 \times 10^6$ J.

18. $S = \pi(0{,}25 \times 10^{-3}\text{ m})^2 = 1{,}96 \times 10^{-7}$ m^2; $R = \rho L/S = (1{,}68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m})(15\text{ m})/(1{,}96 \times 10^{-7}\text{ m}^2) = 1{,}3\ \Omega$.

19. Dal grafico la retta del rame raggiunge 13,9 Ω verso 120 °C. Con la formula: $\Delta T = (13{,}9/10{,}0 - 1)/(3{,}9 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}) = 100$ K, quindi $t = 20\text{ °C} + 100\text{ °C} = 120$ °C. Nicromo: $R = 10{,}0\ \Omega \times (1 + 4 \times 10^{-4} \times 100) = 10{,}4\ \Omega$.

20. $I = P/\Delta V = 1500$ W/230 V = 6,5 A; $R = \Delta V^2/P = (230\text{ V})^2/1500\text{ W} = 35\ \Omega$ (oppure $\Delta V/I$).

21. Da $R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$: $\Delta T = (127{,}72/100{,}00 - 1)/(3{,}85 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}) = 72{,}0$ K, quindi $t = 72{,}0$ °C.

22. in serie; nulla; in parallelo; infinita.

23. Da $P = RI^2$: $I_{\text{max}} = \sqrt{(0{,}25\text{ W}/47\ \Omega)} = 7{,}3 \times 10^{-2}$ A = 73 mA. Da $P = \Delta V^2/R$: $\Delta V_{\text{max}} = \sqrt{(0{,}25\text{ W} \times 47\ \Omega)} = 3{,}4$ V. Controllo: 3,43 V/47 Ω = 73 mA.

24. a) $S = \pi(0{,}60 \times 10^{-2}\text{ m})^2 = 1{,}13 \times 10^{-4}$ m^2; $R = \rho L/S = (2{,}65 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m})(2{,}0 \times 10^3\text{ m})/(1{,}13 \times 10^{-4}\text{ m}^2) = 0{,}47\ \Omega$. b) $\Delta V = RI = 0{,}469\ \Omega \times 150$ A = 70 V; $P = RI^2 = 0{,}469\ \Omega \times (150\text{ A})^2 = 1{,}1 \times 10^4$ W. c) A parità di R e di L, S è proporzionale a ρ: $S_{\text{Cu}} = S_{\text{Al}} \times 1{,}68/2{,}65$; il diametro scala con la radice: $d = 1{,}2\text{ cm} \times \sqrt{(1{,}68/2{,}65)} = 0{,}96$ cm.

25. a) $I = P/\Delta V = 2000$ W/230 V = 8,7 A; $R = \Delta V^2/P = (230\text{ V})^2/2000\text{ W} = 26\ \Omega$. b) 1,5 L d'acqua hanno massa 1,5 kg; $Q = mc\Delta T = 1{,}5\text{ kg} \times 4186\text{ J/(kg·K)} \times 82\text{ K} = 5{,}1 \times 10^5$ J; $\Delta t = Q/P = 5{,}15 \times 10^5\text{ J}/2000\text{ W} = 2{,}6 \times 10^2$ s, circa 4,3 minuti. c) Energia elettrica in 5,0 min: 2000 W × 300 s = $6{,}0 \times 10^5$ J; frazione $5{,}15 \times 10^5/6{,}0 \times 10^5 = 0{,}86$, cioè l'86%. Il resto scalda il bollitore e l'aria.

26. a) Moli per metro cubo: 2700×10^3 g/(26,98 g/mol) = $1{,}001 \times 10^5$ mol; atomi: $1{,}001 \times 10^5 \times 6{,}02 \times 10^{23} = 6{,}02 \times 10^{28}$; con 3 elettroni per atomo $n = 1{,}8 \times 10^{29}$ m^{-3}. b) Dalla relazione $I = neSv_d$: v_d = 4,0 A/[$(1{,}81 \times 10^{29}$ m$^{-3})(1{,}60 \times 10^{-19}$ C)$(2{,}5 \times 10^{-6}$ m$^2)$] = $5{,}5 \times 10^{-5}$ m/s. c) Per un tratto di lunghezza L, per le due leggi di Ohm $\Delta V = RI = \rho LI/S$, quindi $E = \Delta V/L = \rho I/S$ = $(2{,}65 \times 10^{-8}$ Ω·m$)(4{,}0$ A$)/(2{,}5 \times 10^{-6}$ m$^2) = 4{,}2 \times 10^{-2}$ V/m. Il campo è nullo dentro un conduttore soltanto in equilibrio elettrostatico; un filo percorso da corrente non è in equilibrio, e senza campo gli elettroni non deriverebbero.

27. a) $Q = C\Delta V = 2{,}2 \times 10^{-3}$ F × 9,0 V = $2{,}0 \times 10^{-2}$ C; $U = \frac{1}{2}C\Delta V^2 = \frac{1}{2} \times 2{,}2 \times 10^{-3}$ F × $(9{,}0$ V$)^2 = 8{,}9 \times 10^{-2}$ J (capitolo 12). b) $I_{media} = Q/\Delta t$ = 0,0198 C/0,10 s = 0,20 A. c) Per la conservazione dell'energia tutta l'energia del condensatore diventa energia interna del resistore per effetto Joule: $8{,}9 \times 10^{-2}$ J; potenza media 0,089 J/0,10 s = 0,89 W.

28. a) $N/\Delta t = I/e = 5{,}0 \times 10^{-4}$ A/$1{,}60 \times 10^{-19}$ C = $3{,}1 \times 10^{15}$ elettroni al secondo. b) Per la conservazione dell'energia (capitolo 11) $K = e\Delta V$ = 2,0 keV = $1{,}60 \times 10^{-19}$ C × $2{,}0 \times 10^3$ V = $3{,}2 \times 10^{-16}$ J; $v = \sqrt{(2K/m)} = \sqrt{(2 \times 3{,}2 \times 10^{-16}$ J/$9{,}11 \times 10^{-31}$ kg$)} = 2{,}7 \times 10^7$ m/s (il 9% di c: la fisica classica è ancora una buona approssimazione). c) Ogni secondo arrivano $3{,}1 \times 10^{15}$ elettroni con $3{,}2 \times 10^{-16}$ J ciascuno: P = 1,0 W, uguale a $\Delta V \cdot I = 2{,}0 \times 10^3$ V × $5{,}0 \times 10^{-4}$ A. d) $\Delta Q = I\Delta t = 5{,}0 \times 10^{-4}$ A × 60 s = $3{,}0 \times 10^{-2}$ C.

29. a) In funzionamento, a tensione fissata: $R = \Delta V^2/P = (230$ V$)^2/1000$ W = 52,9 Ω. b) Per la dipendenza dalla temperatura, con ΔT = 500 K: R_{20} = 52,9 Ω/(1 + $4{,}0 \times 10^{-4} \times 500$) = 52,9 Ω/1,20 = 44,1 Ω. c) $S = \pi(0{,}25 \times 10^{-3}$ m$)^2 = 1{,}96 \times 10^{-7}$ m^2; per la seconda legge di Ohm, usando la resistività a 20 °C con la resistenza a 20 °C: $L = R_{20}S/\rho$ = 44,1 Ω × $1{,}96 \times 10^{-7}$ m$^2/1{,}1 \times 10^{-6}$ Ω·m = 7,9 m. d) A freddo: I = 230 V/44,1 Ω = 5,2 A; $P = (230$ V$)^2/44{,}1$ Ω = $1{,}2 \times 10^3$ W, il 20% in più della potenza a regime, che cala man mano che il filo si scalda.

30. a) X: 50 Ω; 50 Ω; 49 Ω; 50 Ω. Y: 50 Ω; 63 Ω; 73 Ω; 83 Ω. b) X è ohmico: $\Delta V/I$ è costante entro le incertezze di misura, $R \approx 50$ Ω. c) Per Y la resistenza cresce con la tensione: si comporta come il filamento di una lampadina, che si scalda all'aumentare della corrente.

31. a) 80 L d'acqua hanno massa 80 kg; $Q = mc\Delta T$ = 80 kg × 4186 J/(kg·K) × 40 K = $1{,}34 \times 10^7$ J = $1{,}34 \times 10^7/3{,}6 \times 10^6$ kWh = 3,72 kWh. b) E_{el} = 3,72 kWh/0,90 = 4,13 kWh; $\Delta t = E_{el}/P$ = 4,13 kWh/1,2 kW = 3,4 h, circa 3 ore e 27 minuti. c) $I = P/\Delta V$ = 1200 W/230 V = 5,2 A. d) 4,13 kWh × 0,25 €/kWh = 1,03 €, circa 1 euro.

32. Traccia di risposta. $S = \pi(0{,}60 \times 10^{-2}$ m$)^2 = 1{,}13 \times 10^{-4}$ m^2; resistenza di 5 cm di cavo: $R = (2{,}65 \times 10^{-8}$ Ω·m$)(0{,}05$ m$)/(1{,}13 \times 10^{-4}$ m$^2) = 1{,}2 \times 10^{-5}$ Ω; $\Delta V = RI$ = $1{,}2 \times 10^{-5}$ Ω × 500 A ≈ 6×10^{-3} V. Pochi millivolt: il corpo dell'uccello, in parallelo a quel tratto di cavo, è attraversato da una corrente trascurabile. Il potenziale del cavo rispetto a terra non conta, conta la differenza di potenziale fra i punti toccati. Toccando due cavi a potenziali diversi, l'uccello avrebbe ai capi una tensione enorme e sarebbe attraversato da una corrente letale.

33. L'errore è nella conversione: 1 mm$^2 = (10^{-3}$ m$)^2 = 10^{-6}$ m^2, non 10^{-3} m^2. Corretto: $R = (1{,}68 \times 10^{-8}$ Ω·m$)(10$ m$)/(1 \times 10^{-6}$ m$^2) = 0{,}17$ Ω. Il risultato dello studente era 1000 volte troppo piccolo; un controllo di plausibilità (qualche decimo di ohm per i fili di una prolunga) avrebbe segnalato il problema.

34. Traccia di risposta. Misura il diametro d del filo con il micrometro in più punti e calcola $S = \pi d^2/4$. Collega con morsetti un tratto di filo di lunghezza L nota, con l'amperometro in serie e il voltmetro in parallelo al tratto; usa correnti piccole perché il filo non si scaldi. Per 5–6 lunghezze diverse misura ΔV e I e calcola $R = \Delta V/I$. Il grafico di R in funzione di L deve essere una retta per l'origine di pendenza ρ/S: quindi ρ = pendenza × S. L'incertezza su ρ è dominata da quella su d, che entra al quadrato; il metodo delle diverse lunghezze elimina l'effetto delle resistenze dei contatti, che spostano la retta senza cambiarne la pendenza.

35. Traccia di risposta. In funzionamento $R = (230$ V$)^2/60$ W = $8{,}8 \times 10^2$ Ω e I = 60 W/230 V = 0,26 A. Nel primo istante il filamento è freddo: I = 230 V/65 Ω = 3,5 A e $P = (230$ V$)^2/65$ Ω = $8{,}1 \times 10^2$ W, circa 13,6 volte i valori a regime. Per una frazione di secondo il filamento riceve una potenza enorme e si scalda bru-

scamente; i punti in cui il filo si è assottigliato per l'evaporazione del tungsteno hanno resistenza maggiore, quindi dissipano di più (a parità di corrente conta RI^2) e si scaldano ancora di più: lì il filamento fonde. A regime, con la resistenza alta, la corrente è molto minore.