CAPITOLO

5

Energia elettrica, sicurezza e conduzione nella materia

Una corrente non si consuma: passa. Ciò che lascia lungo il cammino è energia, che diventa calore, luce, movimento.

OBIETTIVI

1. Calcolare la potenza e l'energia elettrica ($P = \Delta V \cdot I = RI^2 = \Delta V^2/R$; il kilowattora) e spiegare l'effetto Joule.
2. Descrivere l'impianto elettrico di casa, le sue protezioni (fusibile, magnetotermico, differenziale, messa a terra) e i rischi della corrente per il corpo umano.
3. Usare la capacità di una batteria e spiegare la carica e la scarica di un condensatore con la costante di tempo $\tau = RC$.
4. Spiegare la conduzione negli elettroliti e l'elettrolisi, e il funzionamento di pile e accumulatori.
5. Descrivere la conduzione nei gas e nei semiconduttori, fino a diodi, LED e celle fotovoltaiche.

INDICE DEL CAPITOLO

5.1 L'effetto Joule e la potenza elettrica 2
5.2 L'impianto elettrico di casa e la sicurezza 8
5.3 Batterie e condensatori: immagazzinare l'energia elettrica 11
5.4 La conduzione nei liquidi 14
5.5 La conduzione nei gas e nei semiconduttori 17

Fisica 5 · Parte II · La corrente elettrica · versione 1.0
Capitolo 5: Energia elettrica, sicurezza e conduzione nella materia · pagine 133–156 del volume completo · estratto per lo studio

Accendi l'asciugacapelli e in pochi secondi esce aria calda; appoggi il telefono sul caricatore la sera e la mattina è carico; sfiori per errore un filo scoperto e il «salvavita», con uno scatto secco, toglie la corrente a tutta la casa. Dietro questi gesti di ogni giorno c'è sempre la stessa grandezza: l'energia che una corrente elettrica trasporta e che cede lungo il suo cammino.

Nel capitolo 4 hai imparato a calcolare correnti e differenze di potenziale nei circuiti. Ora ci chiediamo quanta energia la corrente trasferisce e dove va a finire: in calore, in luce, in energia chimica. Vedrai come è fatto, e come ti protegge, l'impianto elettrico di casa; come si immagazzina energia in una batteria e in un condensatore; e come conducono la corrente i materiali diversi dai metalli: le soluzioni, i gas e i semiconduttori di cui sono fatti i LED e le celle solari.

5.1 L'effetto Joule e la potenza elettrica

5.1.1 Il lavoro del campo sulle cariche

Consideriamo un tratto di circuito, per esempio un resistore, ai cui capi c'è una differenza di potenziale ΔV. Nel capitolo 3 hai visto che, quando una carica q si sposta fra due punti la cui differenza di potenziale è ΔV, la forza elettrica compie su di essa il lavoro $q\Delta V$. Se in un intervallo di tempo Δt attraversa il resistore la carica ΔQ, il campo compie il lavoro $W = \Delta Q \cdot \Delta V$. Dividendo per Δt si ottiene il lavoro compiuto nell'unità di tempo, cioè la potenza (Fisica 3, capitolo 15); e poiché $\Delta Q/\Delta t$ è l'intensità di corrente I:

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

È la **potenza elettrica** trasferita a quel tratto di circuito: il prodotto della tensione ai suoi capi per la corrente che lo attraversa. Le unità tornano: $1\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 1\ (\text{J/C}) \cdot (\text{C/s}) = 1\ \text{J/s} = 1\ \text{W}$. Una lampada che, collegata a 230 V, assorbe 0,050 A riceve 11,5 W; un forno che a 230 V assorbe 9,6 A riceve circa 2,2 kW.

La relazione $P = \Delta V \cdot I$ vale per qualunque utilizzatore: un resistore, un motore, una batteria che si ricarica. Per un conduttore ohmico possiamo usare la prima legge di Ohm, $\Delta V = RI$, ed eliminare una delle due grandezze:

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

Per un resistore le tre espressioni sono equivalenti, e si sceglie quella che usa i dati noti. La seconda dice che, a parità di resistenza, la potenza cresce con il *quadrato* della corrente: se la corrente raddoppia, la potenza quadruplica (Figura 5.1).

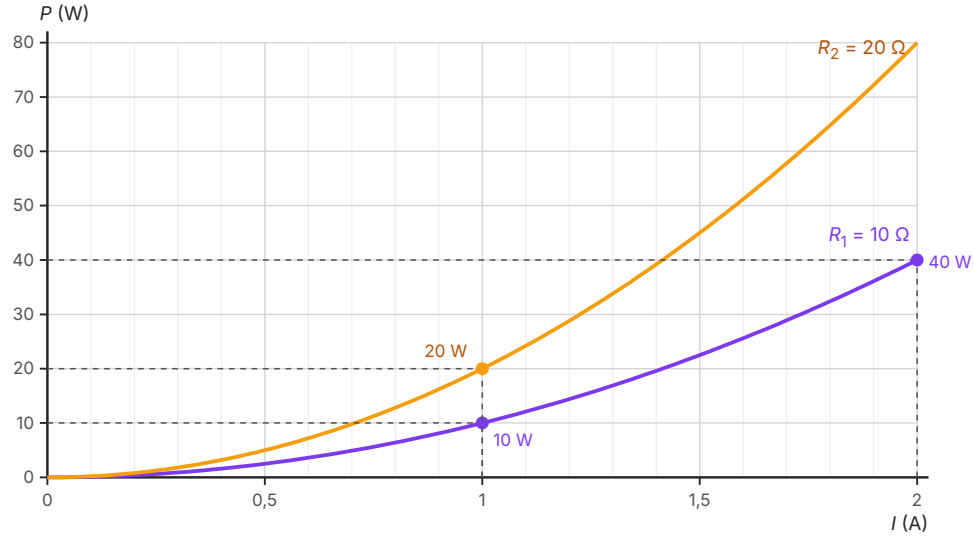


Figura 5.1 Potenza dissipata da due resistori, di 10 Ω e di 20 Ω, in funzione della corrente che li attraversa: $P = RI^2$ (curve calcolate). A parità di resistenza, raddoppiando la corrente la potenza quadruplica (da 10 W a 40 W); a parità di corrente, il resistore con la resistenza doppia dissipa una potenza doppia.

5.1.2 Dove va l'energia: l'effetto Joule

In un filo metallico il campo elettrico accelera gli elettroni liberi, che però percorrono un tratto brevissimo prima di urtare gli ioni del reticolo (capitolo 4). A ogni urto cedono agli ioni l'energia cinetica guadagnata, e gli ioni vibrano più intensamente attorno alle loro posizioni: l'energia interna del metallo aumenta e il metallo si scalda. Il lavoro del campo elettrico diventa così energia interna del conduttore, che poi passa all'ambiente come calore. È l'**effetto Joule**, dal nome di James Prescott Joule, che nel 1841 trovò sperimentalmente che il calore prodotto in un filo è proporzionale alla sua resistenza e al quadrato della corrente: lo stesso Joule del mulinello che misurò l'equivalente meccanico della caloria (Fisica 4, capitolo 7).

L'effetto Joule è voluto in tutti gli apparecchi che servono a scaldare: stufette, bollitori, forni, ferri da stiro, asciugacapelli, tostapane. Il loro cuore è un resistore, spesso un filo di nicromo (Tabella A.2 in Appendice), una lega che sopporta temperature alte senza ossidarsi. È invece indesiderato nei cavi che portano la corrente: lì è energia perduta e, se la corrente è eccessiva, un pericolo, perché un cavo surriscaldato può fondere il suo isolante e innescare un incendio.

Perché allora in una stufetta si scalda il resistore e non il cavo di alimentazione, che è percorso dalla stessa corrente? Perché resistore e cavo sono in serie: la corrente è la stessa, e la potenza RI^2 è proporzionale alla resistenza. I due conduttori di rame del cavo, lunghi un paio di

metri e di sezione grande, hanno insieme una resistenza di qualche centesimo di ohm; il resistore della stufetta, di qualche decina di ohm. Quasi tutta la potenza si sviluppa nel resistore.

ERRORE FREQUENTE

La corrente non si consuma

«La lampadina consuma corrente» è un modo di dire sbagliato. La carica si conserva (capitolo 1): in un circuito la corrente che esce da una lampadina è uguale a quella che vi entra, come mostra un amperometro messo prima e dopo. Ciò che la lampadina trasforma è l'energia: le cariche che la attraversano passano da un potenziale più alto a uno più basso e cedono al filamento l'energia $\Delta Q \cdot \Delta V$. Allo stesso modo la bolletta non fa pagare la corrente ma l'energia, e il generatore non fornisce le cariche, che sono già nei fili, ma l'energia che le mette in moto.

Attenzione anche a un secondo inganno: «più resistenza, più calore» è vero soltanto *a parità di corrente*, come per resistori in serie ($P = RI^2$). A parità di tensione, come per gli apparecchi collegati alla presa, vale $P = \Delta V^2/R$: scalda di più l'apparecchio con la resistenza *minore*. A 230 V una stufetta da 2000 W ha una resistenza di circa 26 Ω, una lampadina a incandescenza da 60 W di circa 880 Ω (con il filamento caldo).

5.1.3 Lampadine a incandescenza e LED

In una lampadina a incandescenza un sottile filamento di tungsteno, percorso dalla corrente, raggiunge una temperatura di qualche migliaio di gradi e diventa incandescente. Un corpo così caldo, però, emette soprattutto radiazione infrarossa, invisibile (l'irraggiamento di Fisica 4, capitolo 7, a cui torneremo nel capitolo 13): solo una piccola frazione dell'energia esce come luce visibile, il resto scalda la lampadina e l'ambiente. Per questo le lampadine a incandescenza sono state ritirate dal mercato europeo e sostituite da quelle a LED, che producono la luce in un altro modo (lo vedrai alla fine del capitolo) e si scaldano molto meno: le confezioni indicano spesso che una lampadina a LED di 8–10 W fa la stessa luce di una a incandescenza da 60 W.

5.1.4 Il kilowattora

L'energia elettrica trasferita in un tempo Δt a un apparecchio di potenza costante P è $E = P\Delta t$. Per gli usi domestici il joule è un'unità troppo piccola: un bollitore da 2000 W ne usa duemila ogni secondo. Si usa allora il **kilowattora** (kWh), l'energia trasferita in un'ora con la potenza di 1 kW:

$$1\ \text{kWh} = 1000\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3{,}6 \times 10^6\ \text{J}$$

Nonostante il nome, il kilowattora non è un'unità di potenza ma di energia: è l'energia che misura il contatore e che la bolletta fa pagare. Il «kW» che compare nei contratti domestici, spesso 3 kW, è invece una potenza: la massima che l'impianto può assorbire in ogni istante, tutta insieme.

ESEMPIO SVOLTO

La stufetta e la bolletta

Problema. Una stufetta elettrica porta l'indicazione «230 V – 2000 W». a) Quale corrente assorbe e qual è la resistenza del suo resistore? b) Se resta accesa 3 ore al giorno per 30 giorni, quanta energia usa, in kWh e in joule? Quanto costa, se il prezzo dell'energia è di 0,25 € al kWh? c) Quale potenza svilupperebbe se fosse collegata a 115 V?

a) Da $P = \Delta V \cdot I$: $I = P/\Delta V = 2000\ \text{W} / 230\ \text{V} \approx 8{,}7\ \text{A}$. Da $P = \Delta V^2/R$: $R = \Delta V^2/P = (230\ \text{V})^2/2000\ \text{W} \approx 26\ \Omega$.

b) Il tempo totale è $3\ \text{h} \cdot 30 = 90\ \text{h}$, quindi $E = P\Delta t = 2{,}0\ \text{kW} \cdot 90\ \text{h} = 180\ \text{kWh} = 180 \cdot 3{,}6 \times 10^6\ \text{J} \approx 6{,}5 \times 10^8\ \text{J}$. Il costo è $180\ \text{kWh} \cdot 0{,}25\ €/\text{kWh} = 45\ €$.

c) Supponendo che la resistenza resti di circa 26 Ω, $P = (115\ \text{V})^2/26{,}45\ \Omega \approx 500\ \text{W}$. Dimezzando la tensione la potenza si riduce a un quarto, perché dipende dal quadrato di ΔV: una stufetta costruita per 230 V, a 115 V, scalda pochissimo. (In realtà la resistenza del filo cambia un poco con la temperatura, capitolo 4: il risultato è un'ottima stima, non un valore esatto.)

DA RICORDARE

Dal volume del quarto anno: calore e rendimento

Il calore necessario per variare di ΔT la temperatura di un corpo di massa m, senza passaggi di stato, è $Q = mc\Delta T$, dove c è il calore specifico (per l'acqua 4186 J/(kg·K)); in un calorimetro alla massa dell'acqua si aggiunge l'equivalente in acqua del recipiente (Fisica 4, capitolo 7). Il rendimento di una trasformazione di energia è il rapporto fra l'energia utile e l'energia spesa, un numero fra 0 e 1, come per le macchine termiche (Fisica 4, capitolo 11).

COLLEGAMENTI

In laboratorio: l'effetto Joule e il rendimento di un riscaldatore

Materiali. Un alimentatore in corrente continua a bassa tensione (12 V); un piccolo riscaldatore a immersione (un resistore isolato) adatto a quella tensione; un amperometro e un voltmetro, o due multimetri; un calorimetro con agitatore, con equivalente in acqua di 15 g ± 5 g, misurato come in Fisica 4, capitolo 7; un termometro digitale (risoluzione 0,1 °C); una bilancia; un cronometro.

Procedimento. Versa nel calorimetro 200,0 g d'acqua a temperatura ambiente e immergi il riscaldatore *prima* di accenderlo. Collega l'amperometro in serie e il voltmetro in parallelo al riscaldatore (capitolo 4). Accendi l'alimentatore, leggi tensione e corrente (qui $\Delta V = 12{,}0\ \text{V} \pm 0{,}1\ \text{V}$ e $I = 3{,}00\ \text{A} \pm 0{,}05\ \text{A}$, costanti durante la prova) e annota la temperatura ogni 60 s agitando di continuo (Tabella 5.1); dopo 6 minuti spegni. Riporta i dati in un grafico temperatura-tempo (Figura 5.2).

Tabella 5.1 Temperatura dell'acqua nel calorimetro durante il riscaldamento (200,0 g d'acqua; dati tipici). Incertezza sui tempi ± 1 s, sulle temperature ± 0,1 °C.

t (s)	0	60	120	180	240	300	360
temperatura (°C)	20,0	22,2	24,4	26,6	28,8	30,9	33,1

Che cosa concludere. La potenza elettrica è $P = \Delta V \cdot I = 12{,}0\ \text{V} \cdot 3{,}00\ \text{A} = 36{,}0\ \text{W}$, con un'incertezza di 0,9 W (incertezze relative 0,8% + 1,7%). I punti del grafico sono ben allineati: la temperatura cresce in modo uniforme, e la retta di miglior accordo ha pendenza 0,0364 °C/s, cioè circa 2,18 °C al minuto. In 360 s l'aumento è quindi di 13,1 °C, e acqua e calorimetro ricevono $Q = (0{,}200 + 0{,}015)\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/(kg·K)} \cdot 13{,}1\ \text{K} \approx 1{,}18 \times 10^4\ \text{J}$. L'energia elettrica spesa è $E = P\Delta t = 36{,}0\ \text{W} \cdot 360\ \text{s} \approx 1{,}30 \times 10^4\ \text{J}$. Il rendimento del riscaldamento è $Q/E \approx 0{,}91 \pm 0{,}06$ (somma delle incertezze relative della potenza, 2,5%, dell'equivalente in acqua, 2,3%, e della variazione di temperatura, 1,5%). Il 9% circa che manca è il calore disperso attraverso il coperchio e i fili e quello che ha scaldato il riscaldatore stesso.

Sicurezza. Si usa soltanto un alimentatore a bassa tensione: la tensione di rete non si usa *mai* in un'attività degli studenti. Il riscaldatore va acceso solo quando è immerso, altrimenti si surriscalda in pochi secondi; dopo la prova scotta. Tieni l'acqua lontana dall'alimentatore.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4: lo scopo, il circuito disegnato con gli strumenti, la tabella con le incertezze, il grafico con la retta di miglior accordo e la sua pendenza, il calcolo della potenza, del calore e del rendimento con le loro incertezze, la discussione delle perdite e di come ridurle (per esempio un coperchio migliore, prove più brevi).

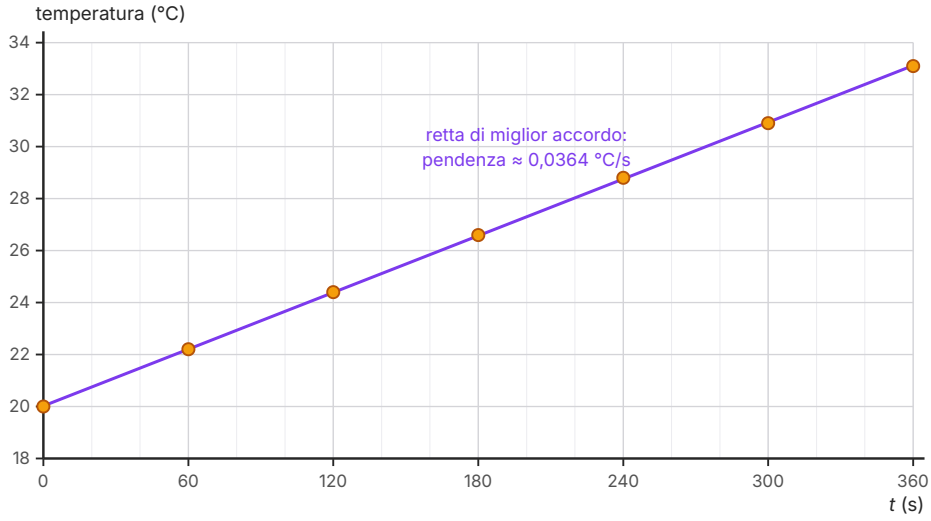


Figura 5.2 Temperatura dell'acqua in funzione del tempo nel laboratorio sull'effetto Joule (dati della Tabella 5.1; l'incertezza di ± 0,1 °C è minore delle dimensioni dei punti). La retta di miglior accordo ha pendenza 0,0364 °C/s: con una potenza costante la temperatura cresce in modo uniforme.

APPROFONDIMENTO

Edison e le città elettriche

La lampadina elettrica non ha un solo inventore. Già all'inizio dell'Ottocento Humphry Davy aveva ottenuto una luce intensissima da una scarica fra due bacchette di carbone, la lampada ad arco. Per decenni molti cercarono di far brillare un filamento percorso da corrente senza che bruciasse in pochi minuti. Alla fine degli anni Settanta del secolo vi riuscirono, quasi contemporaneamente, Joseph Swan in Inghilterra e Thomas Alva Edison negli Stati Uniti, con filamenti di carbone chiusi in un bulbo di vetro da cui era stata tolta l'aria: senza ossigeno il filamento non brucia. Nel 1879, nel suo laboratorio di Menlo Park, Edison ottenne lampade che restavano accese per molte ore.

Il colpo di genio di Edison fu però un altro: capire che una lampadina serve a poco senza un sistema che porti l'energia nelle case. La sua impresa progettò generatori, cavi sotterranei, contatori, interruttori e portalampade, e nel settembre 1882 avviò a New York la centrale di Pearl Street, che forniva corrente continua alle lampade di una parte di Manhattan. L'anno seguente entrò in funzione a Milano, con il sistema di Edison, la centrale di Santa Radegonda, una delle prime d'Europa, che illuminò fra l'altro il Teatro alla Scala. Nel giro di pochi decenni l'elettricità cambiò il volto delle città: la seconda rivoluzione industriale fu anche una rivoluzione della luce. La corrente continua di Edison, però, si trasportava male a grande distanza; nel capitolo 9 vedrai perché la spuntò la corrente alternata.

5.2 L'impianto elettrico di casa e la sicurezza

5.2.1 Gli apparecchi sono in parallelo

Dalla rete arrivano in casa due conduttori, la *fase* e il *neutro*, fra i quali c'è una tensione di 230 V. È una tensione alternata, che oscilla cinquanta volte al secondo, e 230 V è il suo valore «efficace»: lo spiegheremo nel capitolo 9. Per i calcoli di questo capitolo possiamo trattarla come una tensione costante di 230 V.

Tutti gli apparecchi sono collegati in parallelo fra fase e neutro (Figura 5.3), per buone ragioni. Ciascuno lavora alla stessa tensione di 230 V, per la quale è stato costruito; ciascuno si accende e si spegne con il proprio interruttore senza disturbare gli altri; se uno si guasta e interrompe il suo ramo, gli altri continuano a funzionare. In serie, invece, la corrente sarebbe la stessa per tutti, la tensione si dividerebbe fra gli apparecchi e spegnerne uno li spegnerebbe tutti, come accadeva in certe vecchie catene di luci natalizie.

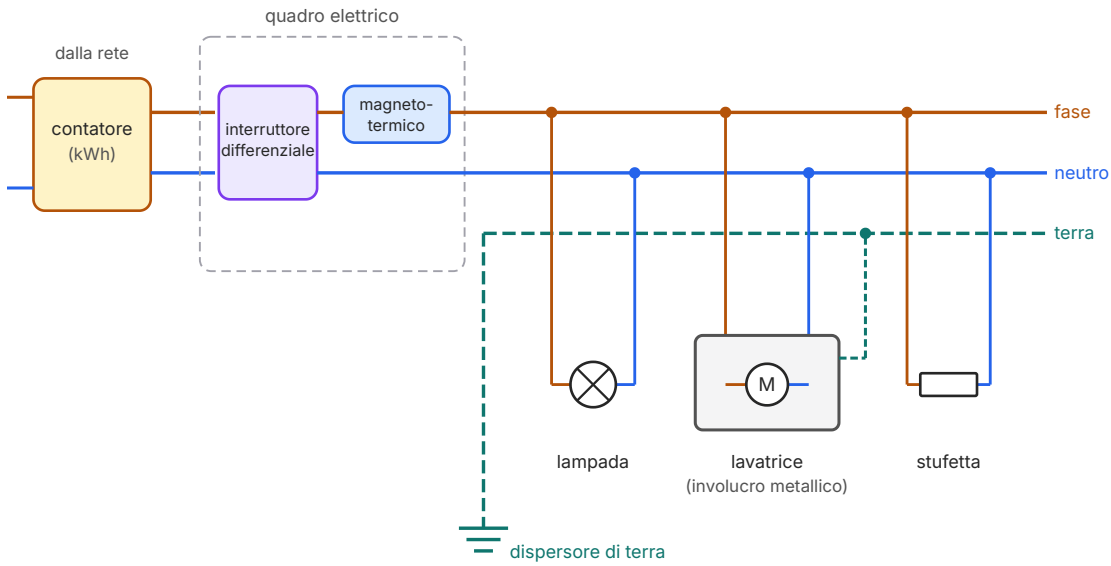


Figura 5.3 Schema semplificato di un impianto domestico. Dopo il contatore, l'interruttore differenziale controlla insieme fase e neutro e il magnetotermico protegge la linea dalle correnti eccessive. Gli apparecchi sono collegati in parallelo fra fase e neutro; l'involucro metallico della lavatrice è collegato al conduttore di protezione (la terra), che termina nel dispersore piantato nel terreno. Nei cavi reali la fase è marrone, nera o grigia, il neutro blu e il conduttore di protezione giallo-verde.

Ogni apparecchio acceso aggiunge un ramo in parallelo: la resistenza equivalente dell'impianto diminuisce (capitolo 4) e la corrente totale, che passa nel contatore e nei cavi principali, cresce, perché è la somma delle correnti dei rami. Accendendo insieme un forno da 2,2 kW, una lavatrice da 2,0 kW e un asciugacapelli da 1,8 kW, la corrente totale a 230 V arriva a circa 26 A.

5.2.2 Le protezioni contro le correnti eccessive

Una corrente eccessiva nei cavi è pericolosa: per l'effetto Joule, raddoppiare la corrente quadruplica il calore sviluppato nei fili. Può succedere per un *sovraccarico*, troppi apparecchi potenti accesi insieme, o per un cortocircuito, quando fase e neutro vengono a contatto attraverso una resistenza quasi nulla (un isolante danneggiato, un oggetto metallico infilato nella presa) e la corrente sale in un istante a valori altissimi.

La protezione più semplice è il **fusibile**: un filo sottile, di una lega che fonde a temperatura relativamente bassa, inserito in serie nella linea. Se la corrente supera il valore per cui è costruito, l'effetto Joule lo fonde e il circuito si apre; poi va sostituito. Negli impianti di oggi si usa l'**interruttore magnetotermico**, che fa lo stesso lavoro senza distruggersi e si riarma con una levetta. Ha due sensori. Il primo è una lamina bimetallica che, scaldata dalla corrente, si incurva per la diversa dilatazione dei due metalli (Fisica 4, capitolo 6) e apre il circuito se il sovraccarico dura; il secondo è un elettromagnete (capitolo 6), che scatta in una frazione di secondo se la corrente sale di colpo, come in un cortocircuito.

5.2.3 Il differenziale e la messa a terra

Il magnetotermico protegge i cavi, non le persone: una corrente capace di fare danni attraversando un corpo umano è troppo piccola per farlo scattare. A questo serve l'**interruttore differenziale**, il «salvavita». Il suo principio è semplice. In un impianto sano la corrente che va agli apparecchi lungo la fase ritorna tutta lungo il neutro, perché la carica si conserva; il differenziale confronta di continuo le due correnti. Se sono diverse, una parte della corrente sta tornando per un'altra via, attraverso la terra: per un guasto, o attraverso una persona che tocca la fase stando a contatto con il suolo. Allora il differenziale apre il circuito in una frazione di secondo. Negli impianti domestici interviene già per differenze di qualche decina di milliampere: il valore è scritto sull'interruttore, spesso 30 mA.

Il differenziale lavora insieme alla messa a terra che hai conosciuto nel capitolo 1. Le parti metalliche degli elettrodomestici, come l'involucro della lavatrice, sono collegate al conduttore giallo-verde e, attraverso questo, a un dispersore metallico piantato nel terreno. Se per un guasto la fase tocca l'involucro, la corrente trova una via di bassa resistenza verso terra e il differenziale, vedendo che non ritorna dal neutro, scatta prima che qualcuno tocchi l'apparecchio. Senza messa a terra l'involucro resterebbe a 230 V rispetto al pavimento, pronto a scaricarsi attraverso la prima persona che lo tocca. Per questo una spina con il contatto di terra non va mai «adattata» a una presa che ne è priva.

ERRORE FREQUENTE

Il salvavita non protegge da tutto

Il differenziale scatta soltanto se una parte della corrente non ritorna dal neutro. Una persona isolata da terra, per esempio su un pavimento di legno asciutto con scarpe di gomma, che toccasse con una mano la fase e con l'altra il neutro, sarebbe attraversata da una corrente che entra dalla fase ed esce dal neutro: per il differenziale sarebbe un utilizzatore come un altro, e non interverrebbe; e nemmeno il magnetotermico, perché la corrente è piccola rispetto a quelle dei cavi. Il salvavita riduce moltissimo i rischi, ma non sostituisce la prudenza: prima di mettere le mani in un impianto si stacca l'interruttore generale, e il lavoro lo fa un elettricista.

5.2.4 La corrente nel corpo umano

Il corpo umano conduce la corrente perché i suoi liquidi sono soluzioni di ioni (vedrai fra poco come conducono). Ciò che fa male non è la tensione in sé, ma la corrente che attraversa il corpo: disturba i nervi e i muscoli, cuore compreso, che funzionano con segnali elettrici, e può provocare ustioni per effetto Joule. Il pericolo dipende dall'intensità della corrente, dal percorso (il più pericoloso attraversa il torace, per esempio da una mano all'altra o da una mano ai piedi) e dalla durata del contatto. Correnti di poche decine di milliampere possono già essere pericolose.

A una data tensione, la corrente che attraversa il corpo dipende dalla sua resistenza, che varia moltissimo con le condizioni: la pelle asciutta oppone una resistenza molto maggiore della pelle bagnata o sudata, e un pavimento umido o l'acqua di una vasca abbassano ancora la resistenza del percorso verso terra. Per questo non si usano mai apparecchi elettrici con le mani bagnate o vicino alla vasca piena. Per la stessa ragione le pile e gli alimentatori a bassa tensione del laboratorio, che attraverso la pelle asciutta fanno passare correnti trascurabili, non sono pericolosi al tatto, mentre la tensione della rete può esserlo sempre.

Un uccello posato su un filo dell'alta tensione non subisce danni: le sue zampe toccano lo stesso conduttore in due punti vicinissimi, fra i quali la differenza di potenziale è minima, e la corrente prosegue quasi tutta nel filo, che ha una resistenza molto minore del suo corpo. Se però con le ali toccasse insieme due fili, o il filo e un traliccio collegato a terra, sarebbe attraversato da una corrente intensa. Per le persone vale lo stesso: il pericolo nasce quando il corpo chiude un circuito fra due punti a potenziale diverso, per esempio fra la fase e la terra.

COLLEGAMENTI

Educazione civica: la sicurezza elettrica a casa e a scuola

Poche regole, ognuna con una ragione fisica. Non collegare troppi apparecchi potenti alla stessa presa multipla: la corrente totale passa nel suo cavo e nei suoi contatti, che si scaldano per effetto Joule. Non tirare la spina per il filo e sostituire i cavi con l'isolante rovinato. Premere ogni tanto il tasto di prova del differenziale (contrassegnato di solito con una «T»): se l'interruttore non scatta, va controllato. Non toccare apparecchi elettrici con le mani bagnate e non usarli vicino all'acqua. Se una persona è rimasta attaccata a un filo, non toccarla: prima si toglie la corrente con l'interruttore generale (o la si allontana con un oggetto isolante, come un bastone di legno asciutto), poi si chiamano i soccorsi al numero di emergenza 112.

5.3 Batterie e condensatori: immagazzinare l'energia elettrica

5.3.1 La capacità di una batteria

Una batteria, o pila, è un generatore che trasforma energia chimica in energia elettrica (vedremo come nel prossimo paragrafo). Due numeri la descrivono. Il primo è la forza elettromotrice f_{em}, che conosci dal capitolo 4: 1,5 V per una pila stilo, circa 3,7 V per la batteria al litio di un telefono, 12 V per la batteria di un'automobile. Il secondo è la **capacità di una batteria**, cioè la carica totale che può far circolare prima di scaricarsi. Si esprime di solito in amperora (A·h) o in milliamperora (mA·h): 1 A·h è la carica che passa in un'ora con una corrente di 1 A,

$$1\ \text{A·h} = 1\ \text{A} \cdot 3600\ \text{s} = 3600\ \text{C}$$

Attenzione: questa «capacità» è una carica e non ha niente a che vedere con la capacità di un condensatore (capitolo 3), che si misura in farad. Moltiplicando la carica per la tensione si ottiene l'energia immagazzinata, $E = Q\Delta V$, che le batterie dichiarano spesso in wattora (W·h): 1 W·h = 3600 J.

ESEMPIO SVOLTO

La batteria del telefono

Problema. La batteria di uno smartphone porta l'indicazione «3,85 V – 4000 mAh». a) Quanta carica può erogare? b) Quanta energia contiene, in W·h e in joule? c) Con un caricatore che fornisce 18 W, quanto tempo serve, al minimo, per caricarla da vuota? d) Se in uso il telefono assorbe in media 1,5 W, quanto dura la carica?

a) $Q = 4000\ \text{mA·h} = 4{,}0\ \text{A} \cdot 3600\ \text{s} = 1{,}44 \times 10^4\ \text{C}$.

b) $E = Q\Delta V = 4{,}0\ \text{A·h} \cdot 3{,}85\ \text{V} = 15{,}4\ \text{W·h} = 15{,}4 \cdot 3600\ \text{J} \approx 5{,}5 \times 10^4\ \text{J}$.

c) $\Delta t = E/P = 15{,}4\ \text{W·h} / 18\ \text{W} \approx 0{,}86\ \text{h}$, circa 51 minuti. È un valore minimo: una parte dell'energia si perde in calore (caricatore e batteria si scaldano), e verso la fine della ricarica il telefono riduce di proposito la potenza per non danneggiare la batteria.

d) $\Delta t = 15{,}4\ \text{W·h} / 1{,}5\ \text{W} \approx 10\ \text{h}$. **Commento.** $5{,}5 \times 10^4$ J bastano a sollevare una massa di 1 kg di oltre 5 km ($h = E/(mg) \approx 5{,}7 \times 10^3$ m): in pochi grammi di materiale la chimica immagazzina molta energia.

5.3.2 Pile in serie e in parallelo

Molti apparecchi usano più pile in serie, con il polo positivo dell'una a contatto con il polo negativo della successiva: le forze elettromotrici si sommano, come le differenze di potenziale lungo un tratto di circuito (capitolo 4). Due stilo da 1,5 V danno 3,0 V, quattro danno 6,0 V; si sommano però anche le resistenze interne. La batteria da 12 V di un'automobile è fatta di sei celle da circa 2 V in serie. Collegando pile uguali in parallelo, invece, la forza elettromotrice resta la stessa e cresce la carica che possono far circolare.

5.3.3 La carica e la scarica di un condensatore

Nel laboratorio del capitolo 3 hai visto che un condensatore, scaricandosi attraverso un resistore, non si svuota tutto in una volta: la tensione ai suoi capi scende prima rapidamente, poi sempre più lentamente. Ora possiamo capire perché. Colleghiamo un condensatore scarico di capacità C, attraverso un resistore R, a un generatore di forza elettromotrice f_{em}: è un *circuito RC*. All'inizio la tensione ai capi del condensatore è zero, tutta la forza elettromotrice è ai capi del resistore e la corrente è la massima possibile, f_{em}/R. Man mano che le armature si caricano, la tensione del condensatore $\Delta V_C = Q/C$ cresce, quella ai capi del resistore, $f_{em} - \Delta V_C$, diminuisce, e con essa la corrente: il condensatore si carica sempre più lentamente. La corrente si annulla, e la carica si arresta, solo quando ΔV_C ha raggiunto f_{em} (Figura 5.4, a sinistra).

Nella scarica accade il contrario. Il condensatore carico, collegato soltanto al resistore, fa circolare una corrente $\Delta V_C/R$ che riduce la sua carica; ma meno carica vuol dire meno tensione, quindi meno corrente, e la scarica rallenta (Figura 5.4, a destra). In entrambi i casi la corrente

attraversa il resistore, che si scalda per effetto Joule: nella scarica, tutta l'energia $\frac{1}{2} C\Delta V^2$ immagazzinata nel condensatore (capitolo 3) finisce in calore.

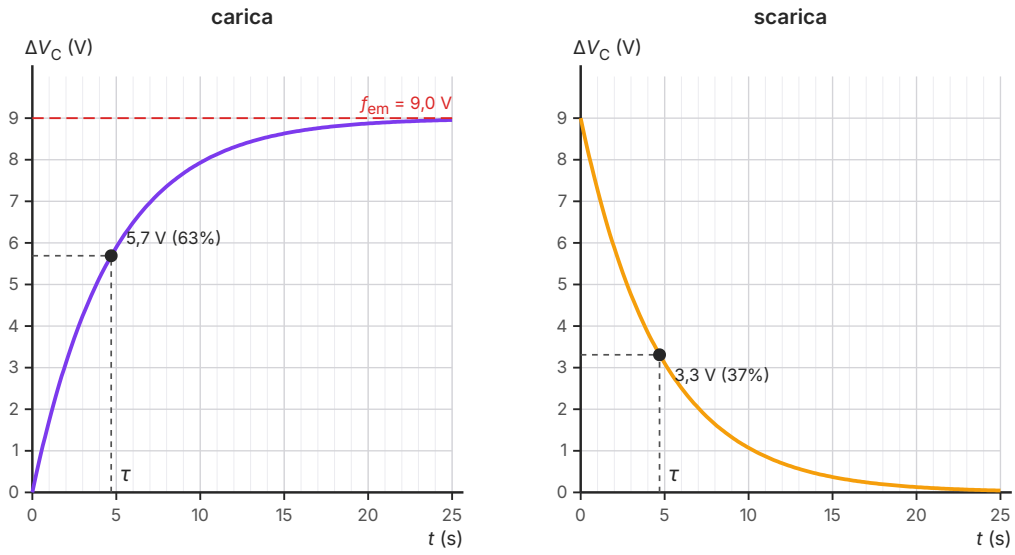


Figura 5.4 Tensione ai capi di un condensatore da 470 µF in un circuito RC con R = 10,0 kΩ (τ = 4,7 s), calcolata. A sinistra la carica, con un generatore di forza elettromotrice 9,0 V; a destra la scarica, partendo da 9,0 V. Le linee tratteggiate segnano l'istante $t = \tau$.

Quanto dura il processo? Dipende dal prodotto della resistenza per la capacità, che si chiama **costante di tempo** del circuito:

$$\tau = RC$$

Controlliamo le unità: Ω · F = (V/A) · (C/V) = C/A = C/(C/s) = s. Il prodotto di una resistenza per una capacità è proprio un tempo. Con un resistore più grande la corrente è più piccola e ci vuole più tempo per spostare la carica; con un condensatore più grande c'è più carica da spostare. Si dimostra (vedi l'Approfondimento) che dopo un tempo τ un condensatore in carica ha raggiunto circa il 63% della tensione finale e uno in scarica è sceso a circa il 37% di quella iniziale; dopo 5τ il processo è concluso a meno dell'1%. Con R = 10 kΩ e C = 470 µF, τ = 4,7 s: in mezzo minuto il condensatore è praticamente carico, o scarico.

I circuiti RC servono ovunque occorra contare un intervallo di tempo o accumulare energia lentamente per restituirla in fretta: il flash di una fotocamera carica il suo condensatore da una piccola batteria in qualche secondo e lo scarica nella lampada in una frazione di millisecondo (capitolo 3); molti temporizzatori elettronici misurano il tempo con la carica di un condensatore.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere una curva di scarica

Problema. Osserva la curva di scarica della Figura 5.4. a) Quanto vale la tensione dopo 5 s e dopo 10 s? b) Dopo quanto tempo la tensione si è dimezzata? E dopo quanto si è ridotta a un quarto? c) Supponendo di non conoscere la capacità, ricavala dal grafico sapendo che R = 10,0 kΩ.

a) Dal grafico: circa 3,1 V dopo 5 s e circa 1,1 V dopo 10 s.

b) La tensione vale 4,5 V dopo circa 3,3 s e 2,25 V dopo circa 6,5 s: il secondo dimezzamento richiede lo stesso tempo del primo. È la proprietà che avevi osservato nel laboratorio del capitolo 3: il tempo di dimezzamento della scarica è costante.

c) La tensione scende al 37% del valore iniziale, 0,37 · 9,0 V ≈ 3,3 V, all'istante $\tau \approx 4{,}7$ s. Quindi $C = \tau/R = 4{,}7\ \text{s} / (1{,}00 \times 10^4\ \Omega) = 4{,}7 \times 10^{-4}$ F = 470 μF. Due cifre significative sono quelle che il grafico permette di leggere.

APPROFONDIMENTO

La legge esponenziale della carica e della scarica

Con gli strumenti dell'analisi matematica, che stai studiando quest'anno in Matematica, si dimostra che durante la scarica la tensione ai capi del condensatore segue la legge

$$\Delta V_C = \Delta V_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

e durante la carica $\Delta V_C = f_{em} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$, dove e ≈ 2,718 è la base dei logaritmi naturali che conosci da Matematica 4. Per $t = \tau$ l'esponenziale vale $e^{-1} \approx 0{,}368$: ecco il 37%, e il 63% = 1 − 0,37. Il tempo in cui la tensione si dimezza si trova risolvendo $e^{-t/\tau} = ½$ con i logaritmi: $t_{½} = \tau \ln 2 \approx 0{,}693\ \tau$, lo stesso qualunque sia la tensione di partenza. Per τ = 4,7 s vale circa 3,3 s, come hai letto nel grafico. La stessa legge, con lo stesso tempo di dimezzamento costante, descrive il decadimento dei nuclei radioattivi, che incontrerai nel capitolo 14.

5.4 La conduzione nei liquidi

5.4.1 Elettroliti e ioni

L'acqua distillata conduce pochissimo; ma basta scioglierci un pizzico di sale da cucina perché una lampadina, collegata a due lamine metalliche immerse e a una pila, si accenda. Il sale, cloruro di sodio, è formato da ioni positivi di sodio, Na^+, e ioni negativi di cloro (ioni cloruro), Cl^-; in acqua il cristallo si scioglie e gli ioni si separano e si muovono liberamente (nel capitolo 1 hai visto che la costante dielettrica dell'acqua, circa 80, indebolisce di ottanta volte l'attrazione fra gli ioni). Una sostanza che, sciolta in acqua o fusa, libera ioni e rende il liquido conduttore si

chiama **elettrolita**: sono elettroliti i sali, gli acidi e le basi. Lo zucchero, che si scioglie in molecole neutre, non lo è.

Immergiamo nella soluzione due conduttori collegati ai poli di un generatore: sono gli **elettrodi**. Quello collegato al polo positivo si chiama **anodo**, quello collegato al polo negativo **catodo**. Fra gli elettrodi c'è un campo elettrico, e gli **ioni** si mettono in moto: quelli positivi, i **cationi**, verso il catodo; quelli negativi, gli **anioni**, verso l'anodo. A differenza dei metalli, dove si muovono soltanto gli elettroni, in un elettrolita la corrente è portata da cariche dei due segni che si muovono in versi opposti; entrambe contribuiscono alla corrente nello stesso verso convenzionale, dall'anodo verso il catodo.

Questi nomi furono coniati tutti insieme nel 1834 da Michael Faraday, che studiava in modo sistematico il passaggio della corrente nelle soluzioni, dopo averli discussi con William Whewell, studioso di Cambridge e inventore di parole scientifiche: è sua anche la parola inglese *scientist*, «scienziato».

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Faraday voleva parole che non contenessero ipotesi sulla natura della corrente, e le cercò nel greco. **Elettrodo** unisce ἤλεκτρον, «ambra», da cui viene anche *elettricità* (capitolo 1), e ὁδός, «via»: l'elettrodo è la via per cui la corrente entra nella soluzione o ne esce. **Anodo** viene da ἄνοδος, «via in su», e **catodo** da κάθοδος, «via in giù»: la stessa ὁδός che si ritrova in *metodo* e in *periodo*, preceduta da ἀνά, «su», e da κατά, «giù».

Ione è ἰών, «che va», participio di εἶμι, «andare»: lo ione è ciò che viaggia verso un elettrodo; **catione** e **anione** sono gli ioni che vanno verso il catodo e verso l'anodo. **Elettrolisi** unisce ἤλεκτρον a λύσις, «scioglimento», dal verbo λύω, «sciogliere», lo stesso di *analisi*: la corrente «scioglie» un composto nei suoi componenti; **elettrolita** unisce ἤλεκτρον a λυτός, «che si può sciogliere», dallo stesso verbo.

5.4.2 L'elettrolisi

Quando gli ioni arrivano agli elettrodi, scambiano elettroni con essi e si trasformano: al catodo i cationi acquistano elettroni, all'anodo gli anioni, o le molecole d'acqua, li cedono. Avvengono così reazioni chimiche provocate dalla corrente: è l'**elettrolisi**. Nell'elettrolisi dell'acqua, resa conduttrice con un sale adatto (per esempio solfato di sodio), al catodo si sviluppa idrogeno e all'anodo ossigeno, e il volume dell'idrogeno è doppio di quello dell'ossigeno, come vuole la formula dell'acqua (Figura 5.5):

$$2\,H_2O \rightarrow 2\,H_2 + O_2$$

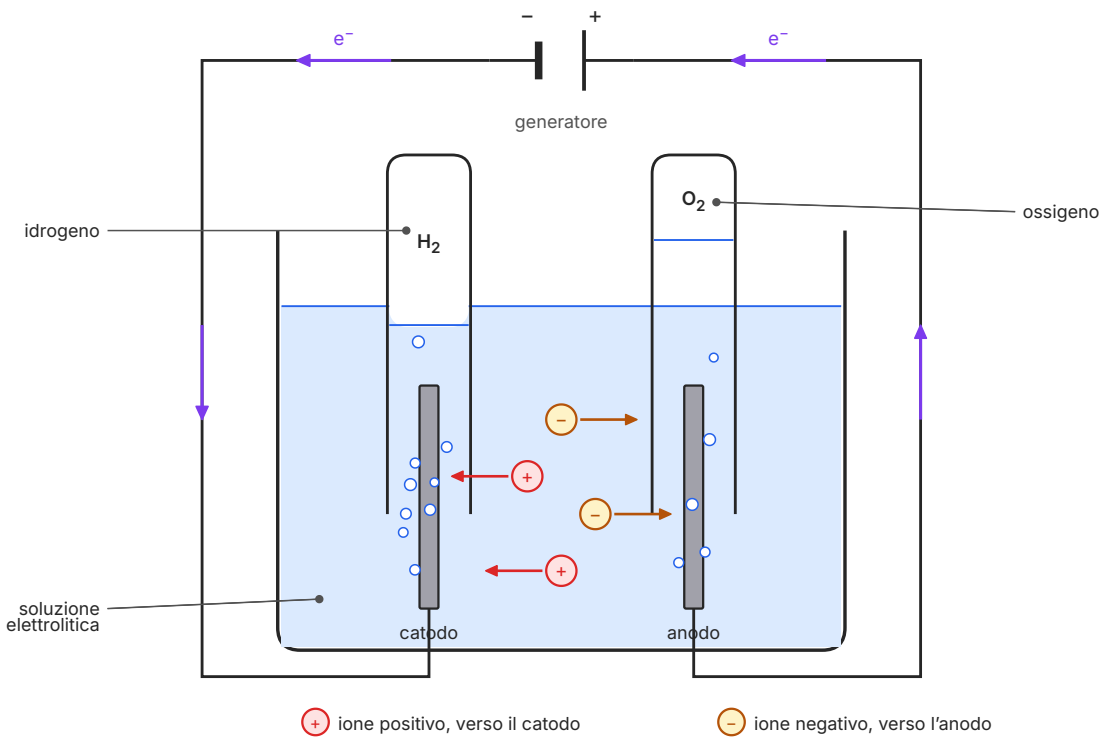


Figura 5.5 Elettrolisi dell'acqua (schema, non in scala). Gli ioni positivi della soluzione migrano verso il catodo, collegato al polo negativo del generatore, quelli negativi verso l'anodo; nel circuito esterno si muovono gli elettroni (frecce viola), dall'anodo verso il polo positivo e dal polo negativo verso il catodo. Al catodo si raccoglie idrogeno, all'anodo ossigeno, in volume metà.

L'energia elettrica diventa energia chimica: idrogeno e ossigeno, ricombinandosi, possono restituirla. L'elettrolisi ha poi molte applicazioni industriali. L'alluminio si produce per elettrolisi del suo ossido, sciolto in un sale fuso; il rame dei cavi elettrici viene purificato per elettrolisi. Con la **galvanostegia** si ricopre un oggetto metallico di un sottile strato di un altro metallo: l'oggetto, collegato come catodo, è immerso nella soluzione di un sale del metallo di rivestimento (per esempio nichel, cromo, argento), i cui cationi vi si depositano acquistando elettroni. Sono fatte così la cromatura dei rubinetti e l'argentatura delle posate.

5.4.3 Pile e accumulatori

Una pila è un'elettrolisi alla rovescia: una reazione chimica spontanea, fra due elettrodi di materiali diversi immersi in un elettrolita, spinge gli elettroni nel circuito esterno e trasforma energia chimica in energia elettrica. La pila di Volta (capitolo 4) era una colonna di dischi di

zinco e di rame separati da cartoni imbevuti di acqua salata; lo stesso Volta, nella lettera del 1800 in cui la descriveva, la chiamò «organo elettrico artificiale», paragonandola all'organo con cui la torpedine dà la scossa.

Una pila si scarica quando i reagenti si esauriscono. In un **accumulatore**, o batteria ricaricabile, la reazione è invece reversibile: facendo passare corrente in verso opposto, il caricabatterie riporta i materiali allo stato iniziale e l'energia elettrica viene immagazzinata come energia chimica. Sono accumulatori la batteria al piombo delle automobili e le batterie agli ioni di litio dei telefoni, dei computer portatili e delle auto elettriche.

5.5 La conduzione nei gas e nei semiconduttori

5.5.1 Le scariche nei gas

L'aria, in condizioni normali, è un ottimo isolante: le sue molecole sono neutre. Contiene però sempre pochi ioni ed elettroni liberi, prodotti dai raggi cosmici e dalla radioattività naturale. Se il campo elettrico è abbastanza intenso, questi elettroni vengono accelerati, fra un urto e l'altro, fino ad avere l'energia per strappare elettroni alle molecole che colpiscono. La **ionizzazione** si moltiplica allora a valanga, il gas diventa conduttore e si ha una **scarica elettrica**. Nell'aria secca, a pressione atmosferica, questo accade per campi di circa 3×10^6 V/m: una scintilla lunga 1 cm richiede circa 30 000 V. La scossa che senti toccando una maniglia dopo aver camminato su un tappeto sintetico rivela che il tuo corpo aveva raggiunto, rispetto alla maniglia, una differenza di potenziale di qualche migliaio di volt.

Il fulmine è una scarica gigantesca. In una nube temporalesca i moti dell'aria separano le cariche: di solito la parte bassa della nube si carica negativamente e induce cariche positive sul suolo sottostante (l'induzione del capitolo 1). Quando il campo diventa abbastanza intenso, si apre fra la nube e il suolo un canale d'aria ionizzata, in cui passa per una frazione di secondo una corrente enorme. Il canale si scalda per effetto Joule a decine di migliaia di gradi: l'aria si dilata violentemente, e l'onda di pressione che ne nasce è il tuono (Fisica 4, capitolo 13). Il parafulmine e il potere delle punte li hai incontrati nel capitolo 2.

Nei gas rarefatti la scarica avviene con tensioni molto minori ed è luminosa: le molecole urtate dagli elettroni emettono luce di colori caratteristici. È il principio delle insegne «al neon» (il neon dà una luce rosso-arancio, altri gas altri colori) e delle lampade a fluorescenza, in cui il vapore di mercurio emette radiazione ultravioletta che un rivestimento sul vetro trasforma in luce visibile. Perché ogni gas emetta i suoi colori lo capirai nel capitolo 14.

5.5.2 I semiconduttori

Fra i buoni conduttori e gli isolanti c'è una classe di materiali con una resistività intermedia, i **semiconduttori**, che hai incontrato nel capitolo 1; il più importante è il silicio. Ogni atomo di silicio ha quattro elettroni esterni, con cui forma quattro legami con gli atomi vicini in un reti-

colo regolare (Figura 5.6). A bassa temperatura gli elettroni restano tutti nei legami e il silicio puro è quasi un isolante; scaldandolo, l'agitazione termica libera un numero crescente di elettroni e la resistività *diminuisce*, al contrario di quanto accade nei metalli (capitolo 4).

Il silicio diventa davvero utile con il **drogaggio**, l'aggiunta controllata di quantità piccolissime di atomi di un altro elemento. Se si aggiunge fosforo, che ha cinque elettroni esterni, quattro formano i legami e il quinto resta libero di muoversi: si ottiene un semiconduttore *di tipo n*, in cui la corrente è portata da cariche negative. Se si aggiunge boro, che ne ha tre, in un legame manca un elettrone. Questa **lacuna** può essere occupata da un elettrone di un legame vicino, che a sua volta lascia una lacuna dietro di sé: la lacuna si sposta come se fosse una carica positiva, e si ottiene un semiconduttore *di tipo p*. Con il drogaggio la conducibilità del silicio si regola di molti ordini di grandezza.

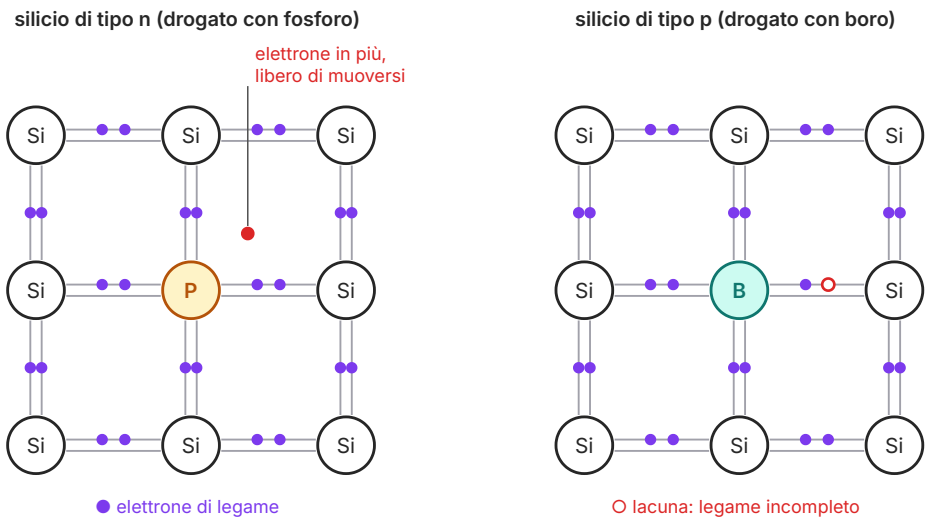


Figura 5.6 Il reticolo del silicio rappresentato nel piano (schema): ogni atomo forma quattro legami con i vicini, ciascuno con due elettroni. A sinistra un atomo di fosforo porta un quinto elettrone, libero di muoversi (tipo n); a destra un atomo di boro lascia un legame incompleto, una lacuna (tipo p).

5.5.3 Diodi, LED e celle solari

Unendo un pezzo di silicio di tipo p e uno di tipo n si ottiene una **giunzione p-n**, il cuore del diodo che hai conosciuto nel capitolo 4: la corrente la attraversa in un solo verso, dalla parte p alla parte n, ed è bloccata nel verso opposto. Fra l'altro, i diodi trasformano la corrente alternata della rete nella corrente continua che ricarica le batterie.

In un **LED** (dall'inglese *light-emitting diode*, «diodo che emette luce») gli elettroni che attraversano la giunzione si ricombinano con le lacune e cedono la loro energia come luce, il cui co-

lore dipende dal materiale semiconduttore. A differenza del filamento, il LED non ha bisogno di scaldarsi per emettere luce: per questo ha un'efficienza molto maggiore. I LED rossi e verdi esistevano da decenni; quelli blu, indispensabili per ottenere una luce bianca, arrivarono negli anni Novanta e valsero il premio Nobel per la fisica del 2014 a Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura.

La **cella fotovoltaica** fa il cammino inverso: la luce che colpisce una giunzione libera elettroni e lacune, che la giunzione separa, e la cella diventa un generatore. È l'*effetto fotovoltaico*, che si capisce soltanto pensando la luce fatta di «pacchetti» di energia: lo studierai nel capitolo 13. Un pannello solare è un insieme di celle collegate in serie e in parallelo, e, a differenza delle centrali, produce energia elettrica senza alcun generatore rotante (capitolo 9).

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Potenza elettrica: $P = \Delta V \cdot I$, in watt (1 V · 1 A = 1 W): l'energia che la corrente cede in un secondo a un tratto di circuito. Per un resistore $P = RI^2 = \Delta V^2/R$: a parità di corrente scalda di più la resistenza maggiore, a parità di tensione la minore.

Energia elettrica: $E = P\Delta t$; 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J è l'energia trasferita in un'ora con la potenza di 1 kW. La bolletta fa pagare l'energia, non la corrente.

Capacità di una batteria: la carica che può far circolare, in A·h (1 A·h = 3600 C); l'energia immagazzinata è $E = Q\Delta V$, in W·h (1 W·h = 3600 J). Pile in serie: le forze elettromotrici si sommano.

Circuito RC: costante di tempo $\tau = RC$, in secondi: la scala di tempo della carica e della scarica. Dopo τ la carica è al 63% circa, la scarica al 37% circa; dopo 5τ il processo è praticamente concluso.

Conduzione nella materia: nei metalli si muovono gli elettroni; negli elettroliti ioni positivi e negativi, in versi opposti, con reazioni chimiche agli elettrodi (elettrolisi); nei gas ionizzati elettroni e ioni (scarica); nei semiconduttori elettroni e lacune, il cui numero si regola con il drogaggio.

Hai seguito l'energia della corrente fino alla luce di un LED. Ma una corrente non si limita a scaldare un filo o a scomporre una soluzione: nel 1820 Hans Christian Oersted si accorse che fa ruotare l'ago di una bussola. Con quella scoperta comincia, nel prossimo capitolo, lo studio del magnetismo.

SINTESI

- La potenza trasferita a un tratto di circuito è $P = \Delta V \cdot I$; per un resistore $P = RI^2 = \Delta V^2/R$. Raddoppiando la corrente in un resistore la potenza quadruplica.
- Nell'effetto Joule gli elettroni, urtando gli ioni del reticolo, trasformano il lavoro del campo elettrico in energia interna del conduttore, che si scalda. È voluto negli apparecchi che scaldano e indesiderato nei cavi.
- La corrente non si consuma: la carica si conserva. Un utilizzatore trasforma l'energia che le cariche gli cedono passando da un potenziale più alto a uno più basso.
- L'energia elettrica si misura in kilowattora: 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J. Le lampadine a incandescenza disperdono in calore e infrarosso gran parte dell'energia; i LED sono molto più efficienti.
- Gli apparecchi di casa sono collegati in parallelo fra fase e neutro, alla tensione di 230 V; ogni apparecchio acceso aumenta la corrente totale.
- Il fusibile e l'interruttore magnetotermico aprono il circuito in caso di sovraccarico o di cortocircuito e proteggono i cavi; l'interruttore differenziale scatta se la corrente che ritorna dal neutro è diversa da quella che va lungo la fase e protegge le persone, insieme alla messa a terra.
- Il pericolo della corrente nel corpo umano dipende dall'intensità, dal percorso e dalla durata; la resistenza del corpo varia moltissimo con le condizioni. Correnti di poche decine di milliampere possono già essere pericolose.
- La capacità di una batteria è la carica che può far circolare, in A·h o mA·h; l'energia immagazzinata è il prodotto della carica per la tensione, in W·h. Le pile in serie sommano le forze elettromotrici.
- Un condensatore si carica e si scarica attraverso un resistore sempre più lentamente; la costante di tempo $\tau = RC$ dà la scala di tempo del processo.
- In un elettrolita la corrente è portata da cationi e anioni che si muovono in versi opposti; agli elettrodi avvengono reazioni chimiche (elettrolisi). Pile e accumulatori trasformano energia chimica in energia elettrica.
- Un gas diventa conduttore quando la ionizzazione si moltiplica a valanga: scintille, fulmini, lampade a scarica.
- Nei semiconduttori la conducibilità si regola con il drogaggio (tipo n e tipo p); con le giunzioni p-n si costruiscono diodi, LED e celle fotovoltaiche.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il kilowattora è un'unità di misura di:
   A. potenza
   B. energia
   C. carica elettrica
   D. intensità di corrente

2. ● In un resistore la corrente raddoppia. La potenza dissipata:
   A. raddoppia
   B. si dimezza
   C. quadruplica
   D. non cambia

3. ● Gli apparecchi di un impianto domestico sono collegati:
   A. in serie, perché siano percorsi tutti dalla stessa corrente
   B. in serie, perché lavorino tutti alla stessa tensione
   C. in parallelo, perché siano percorsi tutti dalla stessa corrente
   D. in parallelo, perché lavorino tutti alla stessa tensione

4. ●● L'interruttore differenziale apre il circuito quando:
   A. la corrente supera il valore massimo sopportato dai cavi
   B. la corrente che va lungo la fase è diversa da quella che ritorna lungo il neutro
   C. la tensione di rete supera 230 V
   D. un apparecchio si surriscalda

5. ● In una soluzione elettrolitica la corrente è dovuta al moto di:
   A. soli elettroni liberi
   B. soli ioni positivi
   C. ioni positivi e ioni negativi, in versi opposti
   D. elettroni e lacune

6. ●● In un circuito RC con $R = 2{,}0\ \text{k}\Omega$ e $C = 100\ \mu\text{F}$ la costante di tempo vale:
   A. 0,20 s
   B. 2,0 s
   C. 20 s
   D. 0,020 s

7. ●● Drogando il silicio con atomi di fosforo, che hanno cinque elettroni esterni, si ottiene:
   A. un semiconduttore di tipo n, con elettroni liberi in più
   B. un semiconduttore di tipo p, con lacune in più
   C. un isolante
   D. un superconduttore

Vero o falso

8. ● In una lampadina accesa la corrente che esce dal filamento è minore di quella che vi entra, perché una parte viene consumata. V / F

9. ● Un uccello posato su un solo filo dell'alta tensione non è attraversato da una corrente pericolosa perché le sue zampe sono praticamente allo stesso potenziale. V / F

10. ●● Due apparecchi sono collegati alla stessa presa a 230 V: quello che ha la resistenza maggiore sviluppa la potenza maggiore. V / F

11. ● Nell'elettrolisi dell'acqua il volume di idrogeno che si sviluppa al catodo è doppio del volume di ossigeno che si sviluppa all'anodo. V / F

Applicare

12. ● Esprimi in joule 2,5 kWh; esprimi in kilowattora $7{,}2 \times 10^7$ J.

13. ● Un tostapane collegato a 230 V assorbe una corrente di 3,9 A. Calcola la sua potenza e la resistenza del suo resistore.

14. ● Una lampadina a LED da 8,5 W resta accesa 5 ore al giorno per un anno. Quanta energia usa, in kWh? Quanto costa, se il prezzo dell'energia è di 0,30 € al kWh?

15. ●● Leggi la Figura 5.1. Quale potenza dissipa il resistore da 10 Ω quando è attraversato da 1,5 A? Quale corrente deve attraversarlo perché dissipi 10 W?

16. ● Completa. Una batteria da 5000 mAh può far circolare una carica di _____ C; se la sua tensione è 3,7 V, l'energia immagazzinata è di _____ W·h, cioè circa _____ kJ.

17. ● Calcola la costante di tempo di un circuito RC con $R = 47$ kΩ e $C = 220$ μF. Dopo quanto tempo, circa, la scarica è praticamente conclusa?

18. ●● La linea della cucina è protetta da un magnetotermico da 16 A, a 230 V. Si possono usare insieme un forno da 2,2 kW e un asciugacapelli da 1,8 kW? Qual è la massima potenza che la linea può alimentare?

Problemi

19. ●● Uno scaldabagno elettrico contiene 80 L d'acqua, che il suo resistore da 1500 W porta da 15 °C a 55 °C; l'isolamento è buono e il 95% dell'energia elettrica finisce nell'acqua. a) Quanto calore riceve l'acqua (Fisica 4, capitolo 7)? b) Quanta energia elettrica serve, in joule e in kWh? c) Quanto tempo occorre? d) Quanto costa, se l'energia costa 0,28 € al kWh?

20. ●●● Due resistori, $R_1 = 60\ \Omega$ e $R_2 = 120\ \Omega$, sono collegati a una batteria ideale da 12,0 V, prima in serie e poi in parallelo (capitolo 4). a) Calcola, nei due casi, la potenza dissipata da ciascun resistore e la potenza totale. b) Se i resistori fossero due lampadine, quale brillerebbe di più nel collegamento in serie, e quale in quello in parallelo? Spiega perché la risposta si inverte.

21. ●●● Un condensatore da 2200 µF è carico a 12 V e viene scaricato attraverso un resistore da 100 Ω. a) Quanta energia contiene all'inizio (capitolo 3)? b) Quanto valgono, all'istante iniziale, la corrente e la potenza dissipata nel resistore? c) Calcola la costante di tempo e stima dopo quanto tempo la scarica è praticamente conclusa. d) Dove è finita, alla fine, l'energia del condensatore?

22. ●● Una stufetta da 2000 W, a 230 V, è collegata con una prolunga lunga 10 m, i cui due conduttori di rame hanno ciascuno una sezione di 1,5 mm^2 (resistività nella Tabella A.2). a) Calcola la resistenza della prolunga, tenendo conto che la corrente percorre entrambi i conduttori. b) Quale potenza si dissipa nella prolunga? Quale frazione è della potenza della stufetta? c) Perché una prolunga avvolta su se stessa, con una stufetta potente, può surriscaldarsi?

23. ●●● Una batteria d'automobile da 12 V ha una capacità di 60 A·h. a) Quanta energia immagazzina, in W·h e in joule? b) Se il conducente dimentica accesi i due fari, da 55 W ciascuno, quale corrente eroga la batteria? Dopo quanto tempo la batteria è scarica? c) A quale altezza si potrebbe sollevare un'auto di 1200 kg con la stessa energia? Commenta il risultato.

Ragionare e argomentare

24. ●● Spiega perché, collegando una stufetta, si scalda il suo resistore e non il cavo di alimentazione, che è percorso dalla stessa corrente. Che cosa succederebbe se il cavo fosse molto sottile?

25. ●●● Commenta la fonte. Nella lettera del 1800 in cui annuncia la pila, Alessandro Volta la definisce un «organe électrique artificiel», «organo elettrico artificiale» (traduzione della redazione), e la paragona all'organo elettrico della torpedine. Che cosa afferma questo paragone? Ha ragione Volta a vedere nella torpedine e nella pila due dispositivi simili? Come potresti verificare che, aumentando il numero di elementi della pila, aumenta la tensione?

26. ●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Un forno da 2 kW acceso per mezz'ora consuma 2 kW · 0,5 h = 1 kWh, cioè 1000 J». Individua l'errore e correggi il risultato.

Verso l'esame

27. ●● **Dal documento.** Osserva la Figura 5.3. a) Quale fenomeno fisico rende pericolosa una corrente eccessiva nei cavi, e quale dispositivo dello schema interviene in quel caso? b) Spiega, con la conservazione della carica, come funziona l'interruttore differenziale e perché l'involucro della lavatrice è collegato a terra. c) Collega l'argomento con l'Educazione civica: quali comportamenti riducono il rischio elettrico in casa?

28. ●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe, spiega come conducono la corrente i metalli, le soluzioni elettrolitiche e i gas: quali cariche si muovono, che cosa le mette in moto e che cosa accade di particolare in ciascun caso.

29. ●●● **Problema breve commentato.** Una scuola sostituisce 200 lampade a incandescenza da 60 W con altrettante lampade a LED da 9 W, che danno la stessa luce. Le lampade restano accese 1500 ore all'anno. a) Quanta energia si risparmia in un anno, in kWh e in joule? b) Quanto vale il risparmio, se l'energia costa 0,25 € al kWh? Commenta il risultato: da dove viene il risparmio, dal punto di vista fisico?

PER APPROFONDIRE

- [FAR] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*: nelle serie dedicate all'elettrolisi (1833–1834) si leggono le pagine in cui Faraday propone, con Whewell, i nomi elettrodo, anodo, catodo e ione.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: i capitoli sulla corrente e sui conduttori mostrano che cosa accade agli elettroni dentro un metallo.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i capitoli sulla corrente, sui circuiti e sui circuiti RC, con molti esercizi sulla potenza elettrica.

Glossario del capitolo

Accumulatore
Batteria ricaricabile, in cui la reazione chimica è reversibile: l'energia elettrica viene immagazzinata come energia chimica e restituita.

Capacità di una batteria
Carica totale che una batteria può far circolare prima di scaricarsi; si esprime in A·h o mA·h (1 A·h = 3600 C).

Cella fotovoltaica
Giunzione p-n che, colpita dalla luce, separa cariche e funziona da generatore (effetto fotovoltaico).

Costante di tempo
Prodotto $\tau = RC$ di un circuito RC, in secondi: la scala di tempo della carica e della scarica del condensatore.

Drogaggio
Aggiunta controllata a un semiconduttore di piccolissime quantità di un altro elemento: si ottiene il tipo n (elettroni in più) o il tipo p (lacune).

Effetto Joule
Riscaldamento di un conduttore percorso da corrente: gli elettroni, urtando gli ioni del reticolo, trasformano il lavoro del campo elettrico in energia interna.

Elettrodo
Conduttore attraverso cui la corrente entra in un elettrolita o in un gas, o ne esce; l'anodo è collegato al polo positivo, il catodo al polo negativo.

Elettrolisi
Insieme delle reazioni chimiche provocate dal passaggio di corrente in un elettrolita, che avvengono agli elettrodi.

Elettrolita
Sostanza che, sciolta in acqua o fusa, libera ioni e rende il liquido conduttore: sali, acidi, basi.

Fusibile
Filo di una lega a basso punto di fusione, in serie nella linea, che fonde per effetto Joule e apre il circuito se la corrente è eccessiva.

Galvanostegia
Deposito per elettrolisi di un sottile strato di metallo su un oggetto collegato come catodo (cromatura, argentatura).

Giunzione p-n
Contatto fra un semiconduttore di tipo p e uno di tipo n: lascia passare la corrente in un solo verso ed è il cuore dei diodi, dei LED e delle celle fotovoltaiche.

Interruttore differenziale
Dispositivo («salvavita») che confronta la corrente di fase con quella di neutro e apre il circuito se differiscono, cioè se una parte della corrente va a terra.

Interruttore magnetotermico
Interruttore che apre il circuito in caso di sovraccarico (con una lamina bimetallica) o di cortocircuito (con un elettromagnete) e si riarma a mano.

Ione
Atomo o gruppo di atomi con carica elettrica; i cationi (positivi) migrano verso il catodo, gli anioni (negativi) verso l'anodo.

Kilowattora
Unità di energia: l'energia trasferita in un'ora con la potenza di 1 kW; 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J.

LED
Diodo che emette luce quando gli elettroni che attraversano la giunzione p-n si ricombinano con le lacune; il colore dipende dal semiconduttore.

Potenza elettrica
Energia trasferita in un secondo a un tratto di circuito: $P = \Delta V \cdot I$; per un resistore $P = RI^2 = \Delta V^2/R$. Si misura in watt.

Scarica elettrica
Passaggio di corrente in un gas, reso conduttore dalla ionizzazione a valanga delle sue molecole: scintille, fulmini, lampade a scarica.

Semiconduttore
Materiale, come il silicio, con resistività intermedia fra quella dei conduttori e quella degli isolanti, che diminuisce all'aumentare della temperatura.

Soluzioni

1. B. Il kWh è l'energia trasferita in un'ora con la potenza di 1 kW: 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J.

2. C. $P = RI^2$: a parità di resistenza la potenza è proporzionale al quadrato della corrente, $2^2 = 4$.

3. D. In parallelo tutti gli apparecchi sono alla stessa tensione di 230 V, mentre le correnti dipendono dalle loro resistenze; inoltre si accendono e si spengono indipendentemente.

4. B. Il differenziale confronta la corrente di fase con quella di neutro: se differiscono, una parte della corrente sta andando a terra per un'altra via (un guasto o una persona). Le correnti eccessive sono il compito del magnetotermico.

5. C. Negli elettroliti si muovono i cationi verso il catodo e gli anioni verso l'anodo; elettroni e lacune sono i portatori di carica dei semiconduttori.

6. A. $\tau = RC = 2{,}0 \times 10^3\ \Omega \cdot 1{,}00 \times 10^{-4}\ \text{F} = 0{,}20$ s.

7. A. Quattro dei cinque elettroni del fosforo formano i legami con il silicio, il quinto resta libero: il semiconduttore è di tipo n.

8. F. La carica si conserva: la corrente che esce è uguale a quella che entra. Il filamento trasforma l'energia che le cariche gli cedono, non le cariche.

9. V. Fra due punti vicinissimi dello stesso filo la differenza di potenziale è minima, e la corrente prosegue quasi tutta nel filo, che ha resistenza molto minore del corpo dell'uccello.

10. F. A tensione fissata $P = \Delta V^2/R$: sviluppa la potenza maggiore l'apparecchio con la resistenza minore (per esempio la stufetta, 26 Ω, rispetto a una lampadina, circa 880 Ω).

11. V. Dalla reazione $2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$ si formano due molecole di idrogeno per ogni molecola di ossigeno, e a parità di condizioni i volumi dei gas sono proporzionali al numero di molecole.

12. 2,5 kWh · $3{,}6 \times 10^6$ J/kWh = $9{,}0 \times 10^6$ J; $7{,}2 \times 10^7$ J / ($3{,}6 \times 10^6$ J/kWh) = 20 kWh.

13. $P = \Delta V \cdot I = 230\ \text{V} \cdot 3{,}9\ \text{A} \approx 9{,}0 \times 10^2$ W; $R = \Delta V/I = 230\ \text{V} / 3{,}9\ \text{A} \approx 59\ \Omega$.

14. $E = 8{,}5\ \text{W} \cdot 5\ \text{h} \cdot 365 \approx 1{,}55 \times 10^4$ W·h ≈ 15,5 kWh; costo 15,5 kWh · 0,30 €/kWh ≈ 4,7 €.

15. Dalla curva del resistore da 10 Ω: a 1,5 A la potenza è circa 22–23 W (calcolo: $P = 10\ \Omega \cdot (1{,}5\ \text{A})^2 = 22{,}5$ W); per 10 W serve una corrente di 1,0 A ($I = \sqrt{(P/R)} = \sqrt{(10\ \text{W} / 10\ \Omega)} = 1{,}0$ A).

16. 5000 mA·h = 5,0 A · 3600 s = $1{,}8 \times 10^4$ C; $E =$ 5,0 A·h · 3,7 V = 18,5 W·h ≈ 19 W·h; 18,5 · 3600 J ≈ 67 kJ.

17. $\tau = RC = 4{,}7 \times 10^4\ \Omega \cdot 2{,}20 \times 10^{-4}\ \text{F} \approx 10$ s (10,3 s); la scarica è praticamente conclusa dopo circa $5\tau \approx$ 52 s, poco meno di un minuto.

18. No. La potenza totale è 2,2 kW + 1,8 kW = 4,0 kW e la corrente $I = 4000\ \text{W} / 230\ \text{V} \approx 17$ A supera i 16 A: è un sovraccarico, e se dura il magnetotermico può intervenire, tanto più presto quanto più la corrente supera il valore nominale. La potenza massima è 16 A · 230 V ≈ 3,7 kW (3680 W).

19. a) $Q = mc\Delta T = 80\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/(kg·K)} \cdot 40\ \text{K} \approx 1{,}34 \times 10^7$ J. b) $E = Q/0{,}95 \approx 1{,}41 \times 10^7$ J ≈ 3,9 kWh. c) $\Delta t = E/P = 1{,}41 \times 10^7\ \text{J} / 1500\ \text{W} \approx 9{,}4 \times 10^3$ s ≈ 2,6 h. d) 3,92 kWh · 0,28 €/kWh ≈ 1,1 €.

20. a) Serie: $R_{eq} = 180\ \Omega$, $I = 12{,}0\ \text{V} / 180\ \Omega \approx 0{,}0667$ A; $P_1 = 60\ \Omega \cdot (0{,}0667\ \text{A})^2 \approx 0{,}27$ W, $P_2 \approx 0{,}53$ W, totale 0,80 W. Parallelo: ciascuno è a 12,0 V; $P_1 = (12{,}0\ \text{V})^2/60\ \Omega = 2{,}4$ W, $P_2 = 1{,}2$ W, totale 3,6 W. b) In serie, a parità di corrente, brilla di più la lampadina con la resistenza maggiore ($P = RI^2$); in parallelo, a parità di tensione, quella con la resistenza minore ($P = \Delta V^2/R$). La risposta si inverte perché cambia la grandezza che resta uguale per i due resistori.

21. a) $U = \frac{1}{2}\, C\Delta V^2 = \frac{1}{2} \cdot 2{,}2 \times 10^{-3}\ \text{F} \cdot (12\ \text{V})^2 \approx 0{,}16$ J. b) $I_0 = 12\ \text{V} / 100\ \Omega = 0{,}12$ A; $P_0 = (12\ \text{V})^2/100\ \Omega =$

1,44 W ≈ 1,4 W. c) $\tau = 100\ \Omega \cdot 2{,}2 \times 10^{-3}\ \text{F} = 0{,}22$ s; la scarica è praticamente conclusa dopo $5\tau \approx 1{,}1$ s. d) Tutta l'energia del condensatore è stata dissipata nel resistore per effetto Joule ed è diventata energia interna del resistore e poi calore ceduto all'ambiente.

22. a) Lunghezza totale percorsa dalla corrente 20 m: $R = \rho L/S = 1{,}68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m} \cdot 20\ \text{m} / 1{,}5 \times 10^{-6}\ \text{m}^2 \approx 0{,}22\ \Omega$. b) $I \approx 2000\ \text{W} / 230\ \text{V} \approx 8{,}7$ A; $P = RI^2 \approx 0{,}224\ \Omega \cdot (8{,}7\ \text{A})^2 \approx 17$ W, circa lo 0,85% della potenza della stufetta. c) I 17 W si distribuiscono lungo il cavo; se è avvolto su se stesso, il calore non riesce a disperdersi e la temperatura del cavo sale, fino a danneggiarne l'isolante: per questo le prolunghe avvolgibili vanno svolte del tutto con apparecchi potenti.

23. a) $E = 60\ \text{A}\cdot\text{h} \cdot 12\ \text{V} = 720\ \text{W}\cdot\text{h} = 720 \cdot 3600\ \text{J} \approx 2{,}6 \times 10^6$ J. b) $I = P/\Delta V = 110\ \text{W} / 12\ \text{V} \approx 9{,}2$ A; $\Delta t = 60\ \text{A}\cdot\text{h} / 9{,}17\ \text{A} \approx 6{,}5$ h. c) $h = E/(mg) = 2{,}59 \times 10^6\ \text{J} / (1200\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2) \approx 2{,}2 \times 10^2$ m. **Commento.** L'energia di una batteria d'automobile basterebbe a sollevare l'auto di oltre duecento metri, ma due fari la esauriscono in una notte: i fari restano accesi per ore, e un'ora a 110 W è già quasi 4×10^5 J. In pratica la batteria non riesce ad avviare il motore molto prima di essere del tutto scarica.

24. Traccia. Cavo e resistore sono in serie, quindi percorsi dalla stessa corrente; la potenza $P = RI^2$ si sviluppa in proporzione alla resistenza. Il cavo di rame, corto e di sezione grande, ha una resistenza di qualche centesimo di ohm, il resistore di qualche decina: quasi tutta la potenza va al resistore. Un cavo molto sottile avrebbe una resistenza molto maggiore ($R = \rho L/S$), si scalderebbe e potrebbe fondere l'isolante; per questo la sezione dei cavi si sceglie in base alla corrente che devono portare.

25. Traccia. Volta afferma che la sua pila fa, artificialmente, ciò che l'organo elettrico della torpedine fa in natura: produrre una scossa senza bisogno di strofinio, grazie a una struttura fatta di molti elementi uguali sovrapposti. Il paragone è felice: oggi sappiamo che l'organo elettrico dei pesci è formato da colonne di cellule che si comportano come piccoli generatori collegati in serie, le cui tensioni si sommano come quelle degli elementi della pila. La differenza è nel meccanismo: nella pila la forza elettromotrice viene da reazioni chimiche fra metalli diversi ed elettrolita, nel pesce da cellule viventi. Verifica: costruire pile con 1, 2, 3, … elementi e misurare la tensione a vuoto con un voltmetro; il grafico tensione-numero di elementi dovrebbe essere una retta passante per l'origine.

26. L'errore è nell'ultima uguaglianza: 1 kWh non è 1000 J, ma $1000\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3{,}6 \times 10^6$ J. Il conto in kWh è giusto: $2\ \text{kW} \cdot 0{,}5\ \text{h} = 1\ \text{kWh} \approx 3{,}6 \times 10^6$ J. (Inoltre il forno non «consuma kW»: usa energia, misurata in kWh.)

27. Traccia. a) L'effetto Joule: la potenza dissipata nei fili cresce con il quadrato della corrente, e un cavo surriscaldato può fondere l'isolante e incendiarsi; interviene il magnetotermico (sovraccarico: lamina bimetallica; cortocircuito: elettromagnete). b) La carica si conserva, quindi in un impianto sano la corrente che va lungo la fase ritorna tutta lungo il neutro; se le due correnti differiscono, una parte va a terra per un'altra via e il differenziale apre il circuito. Collegando a terra l'involucro metallico, un guasto che lo mette in contatto con la fase produce subito una corrente verso terra che fa scattare il differenziale, prima che una persona tocchi l'involucro. c) Non sovraccaricare le prese multiple, sostituire i cavi danneggiati, non usare apparecchi con le mani bagnate, provare periodicamente il differenziale, non adattare le spine con il contatto di terra, togliere la corrente prima di soccorrere una persona folgorata.

28. Traccia di risposta. Nei metalli gli elettroni liberi, spinti dal campo elettrico prodotto dal generatore, si muovono lentamente (velocità di deriva) urtando gli ioni del reticolo: ne nasce l'effetto Joule, e il metallo non cambia. Nelle soluzioni elettrolitiche i portatori sono ioni dei due segni, liberati dallo scioglimento di sali, acidi e basi: i cationi vanno verso il catodo, gli anioni verso l'anodo; agli elettrodi gli ioni scambiano elettroni e avvengono reazioni chimiche (elettrolisi), con trasporto di materia. Nei gas, normalmente isolanti, la corrente passa solo se il campo è abbastanza intenso da accelerare i pochi

elettroni liberi fino a ionizzare le molecole: la ionizzazione si moltiplica a valanga e si ha una scarica, spesso luminosa (scintille, fulmini, lampade al neon). In tutti i casi il verso convenzionale della corrente è quello in cui si muoverebbero cariche positive.

29. a) Ogni lampada risparmia 60 W − 9 W = 51 W; in un anno $200 \cdot 51\ \text{W} \cdot 1500\ \text{h} = 1{,}53 \times 10^7\ \text{W·h} = 1{,}53 \times 10^4\ \text{kWh} \approx 5{,}5 \times 10^{10}\ \text{J}$. b) $1{,}53 \times 10^4\ \text{kWh} \cdot 0{,}25\ €/\text{kWh} \approx 3{,}8 \times 10^3\ €$. **Commento.** La luce prodotta è la stessa: il risparmio corrisponde all'energia che le lampade a incandescenza trasformavano in calore e in radiazione infrarossa, invisibile. Il LED emette luce senza bisogno di essere incandescente, e quasi tutta quell'energia non viene più spesa. Il risultato, migliaia di euro e decine di miliardi di joule, mostra che anche piccole potenze, moltiplicate per molti apparecchi e molte ore, diventano grandi quantità di energia.