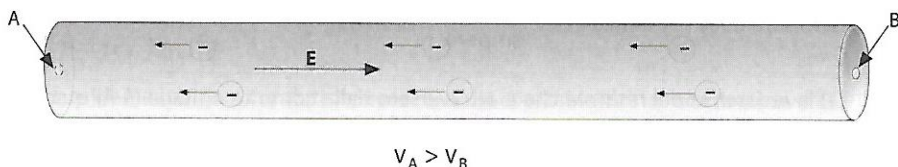


10 | Elettrodinamica

Se tra i capi di un conduttore metallico vi è una differenza di potenziale, gli elettroni liberi di muoversi (elettroni di conduzione) vengono accelerati dal campo E , e si spostano da punti a potenziale minore a punti a potenziale maggiore, in verso opposto a quello del campo, come indicato in figura.



Nei conduttori metallici (conduttori di prima specie) le cariche negative (elettroni) sono libere di muoversi secondo la direzione del campo elettrico, mentre le cariche positive sono bloccate nei nodi reticolari. Nei liquidi e nei gas (conduttori di seconda specie) sia le cariche negative sia le cariche positive possono partecipare alla conduzione elettrica; questo è possibile grazie alla presenza degli ioni che fungono da veicoli trasportatori di cariche.

Affinché si abbia un moto ordinato di cariche in un conduttore è quindi necessaria la presenza di una differenza di potenziale alle sue estremità o, equivalentemente, di un campo elettrico.

Quando le cariche libere attraversano un conduttore in maniera ordinata, si è in presenza di una **corrente elettrica**.



Per convenzione si è scelto come **verso della corrente** quello dello spostamento delle cariche positive (anche se nei solidi tali cariche non si spostano e non contribuiscono al fenomeno della conduzione).

Quindi, in un conduttore solido, il moto delle cariche è sempre contrario a quello della corrente.

Se ai capi A e B di un conduttore si applica una d.d.p. con $V_A > V_B$, il campo elettrico è orientato da A ad B, il verso della corrente è da A a B, ma gli elettroni si muovono da B ad A.

10.1 | Intensità di corrente



L'**intensità di corrente (media)** è il rapporto tra la quantità di carica ΔQ che attraversa una sezione del conduttore in un tempo Δt e l'intervallo di tempo stesso:

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



Unità di misura dell'intensità di corrente nel SI: $\frac{\text{coulomb}}{\text{secondo}} = \text{ampere (A)}$

Un circuito è percorso dalla corrente di 1 ampere quando la sua generica sezione è attraversata da 1 coulomb di carica al secondo. L'intensità di corrente è una grandezza scalare: inoltre è una grandezza fondamentale del Sistema internazionale, con dimensione $[i]$.

La corrente si dice **unidirezionale** se le cariche si muovono sempre nello stesso senso; in particolare si dice **continua** se la sua intensità e il senso di moto delle cariche si mantengono costanti.

La corrente si dice **alternata** se il senso di moto delle cariche subisce delle inversioni periodiche.

10.2 | Leggi di Ohm

10.2.1 | Prima legge di Ohm

Per i conduttori di prima specie (metalli) si osserva proporzionalità tra i e ΔV . Indicando con R la costante di proporzionalità si ha:

$$V_B - V_A = \Delta V = R \cdot i \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\Delta V}{i}$$

La costante di proporzionalità R è detta **resistenza**: è un indice dell'opposizione che incontrano le cariche negative (elettroni) nel muoversi all'interno del conduttore.



Unità di misura della resistenza nel SI: $\frac{\text{volt}}{\text{ampere}} = \text{ohm } (\Omega)$

È unitaria (1Ω) la resistenza del *resistore* che è attraversato dalla corrente unitaria (1 A) quando ai suoi estremi è applicata una d.d.p. unitaria (1 V).



Quale corrente passa nel filamento di una lampadina con resistenza di 100Ω se i due capi della lampadina sono a un potenziale di 2 e 8 volt rispettivamente?

Si tratta di calcolare la differenza di potenziale ai capi della resistenza:

$$\Delta V = (8 - 2) \text{ V} = 6 \text{ V}$$

e applicare la prima legge di Ohm:

$$i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{6 \text{ V}}{100 \Omega} = 0,06 \text{ A} = 60 \text{ mA}$$

Il milliampere (mA) è un sottomultiplo dell'ampere usato piuttosto frequentemente.

10.2.2 | Seconda legge di Ohm

La resistenza elettrica di un filo conduttore è direttamente proporzionale alla lunghezza l del filo e inversamente proporzionale alla sua sezione S :

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

dove ρ è un coefficiente caratteristico del conduttore, che prende il nome di **resistività** o *resistenza specifica* del materiale.



Unità di misura della resistività nel SI: $\text{ohm} \cdot \text{metro } (\Omega \cdot \text{m})$



Conducibilità del materiale: $\lambda = \frac{1}{\rho}$; unità di misura nel SI: $\frac{\text{siemens}}{\text{m}}$

La resistività dipende dal materiale e dalla temperatura a cui tale materiale si trova.



La resistenza dei conduttori di prima specie aumenta all'aumentare della temperatura.

I **semiconduttori**, al contrario, sono materiali la cui resistività, e quindi la resistenza, diminuisce all'aumentare della temperatura. A temperature vicine allo zero assoluto, per alcuni materiali si verifica una brusca riduzione del valore della resistività fino a valori prossimi a zero: tale fenomeno prende il nome di **superconduttività**. Ciascun superconduttore ha una propria temperatura critica, al di sotto della quale la sua resistenza diventa pressoché nulla e la corrente che lo attraversa rimane inalterata per molto tempo anche in assenza di generatori.

Nella tabella seguente vengono elencati alcuni materiali (numerati da 1 a 18) in ordine crescente di resistività (cioè in ordine decrescente di conducibilità).

Conduttori	Semiconduttori	Isolanti
1) argento	8) germanio	13) mica
2) rame	9) silicio	14) vetro
3) alluminio	10) ossido di rame	15) quarzo
4) platino	11) boro	16) porcellana
5) ferro	12) celluloidi	17) ambra
6) acciaio		18) paraffina
7) mercurio		

10.3 | Effetto Joule

L'effetto di riscaldamento di un conduttore causato dalla corrente elettrica che lo attraversa è detto **effetto Joule**. L'energia dissipata per effetto Joule è pari a:

$$L = \Delta V \cdot i \cdot \Delta t = R \cdot i^2 \cdot \Delta t$$

Da questo risultato è possibile calcolare anche la potenza dissipata per effetto Joule:

$$P = \frac{L}{\Delta t} = \Delta V \cdot i = R \cdot i^2 = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

Per ottenere la quantità di calore prodotta per effetto Joule in calorie, occorre ricordare che il legame tra il joule e la caloria è dato dall'equivalente meccanico della caloria, pari a 4,186 J/cal.

Quindi la quantità di calore Q dissipata per effetto Joule, espressa in calorie, è pari a:

$$Q = \frac{R \cdot i^2 \cdot \Delta t}{4,186 \text{ J/cal}}$$



Una lampadina da 75 W è collegata a un generatore da 220 V.

Qual è il valore della corrente che passa nella lampadina?

La potenza dissipata per effetto Joule è $P = \Delta V \cdot i$ quindi l'intensità di corrente vale:

$$i = \frac{P}{\Delta V} = \frac{75 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 0,34 \text{ A}$$



Quanto vale l'energia E dissipata in una resistenza R in un tempo t quando alla resistenza è applicata una tensione V (con $V = 0,2$ volt, $R = 0,10 \Omega$ e $t = 10^{-2}$ secondi)?

L'energia dissipata per effetto Joule è data dalla relazione:

$$E = \Delta V \cdot i \cdot t = R \cdot i^2 \cdot t = \frac{\Delta V^2}{R} \cdot t$$

sostituendo i valori numerici si ottiene:

$$E = \frac{(0,2)^2}{0,1} \cdot 10^{-2} \text{ J} = 0,04 \cdot 10 \cdot 10^{-2} \text{ J} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

10.4 | Circuiti elettrici



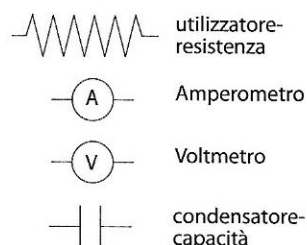
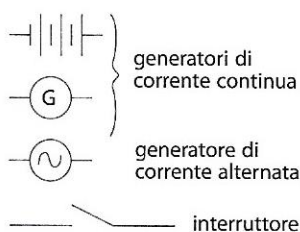
Ogni generatore di corrente continua è dotato di una **forza elettromotrice (f.e.m.)** definita come il rapporto fra il lavoro che il generatore compie sulla carica Q che lo attraversa e la carica stessa. Dalla definizione segue che la f.e.m. si misura in volt.



Numericamente la f.e.m. coincide con la d.d.p. ai capi del generatore quando il circuito è aperto.

Nei circuiti elettrici, la corrente fornita da un **generatore** viene trasformata in altri tipi di energia (luminosa, termica, meccanica o magnetica) a seconda degli elementi utilizzatori in esso presenti.

I simboli con cui si rappresentano i componenti di un circuito elettrico sono riportati a lato.



L'**alternatore** è un generatore di corrente alternata, cioè corrente il cui verso cambia periodicamente.

L'**utilizzatore** (o resistore) è un apparecchio che trasforma l'energia elettrica in altre forme.

L'**amperometro** è uno strumento atto a misurare l'intensità di corrente, mentre il **voltmetro** è un apparecchio che serve a misurare la differenza di potenziale tra due punti di un circuito.

10.4.1 | Resistenze e condensatori in serie e in parallelo

In un circuito elettrico, i vari componenti possono essere disposti in *serie* (attraversati dalla stessa intensità di corrente) o in *parallelo* (ai loro capi vi è la stessa d.d.p.) a seconda delle esigenze.

Nel calcolo delle correnti che circolano nel circuito e delle differenze di potenziale ai capi dei componenti, risulta spesso conveniente sostituire un gruppo di resistenze con la resistenza equivalente e un gruppo di capacità con la capacità equivalente.

✓ La **resistenza equivalente** R_{eq} di più resistenze è quella resistenza che da sola causerebbe la stessa dissipazione di energia per effetto Joule.

✓ La **capacità equivalente** C_{eq} di più condensatori è quella di un condensatore che accumulerebbe da solo la stessa carica.

Il valore della resistenza equivalente si calcola in modo diverso a seconda che le resistenze siano collegate in serie o in parallelo.

Resistenze in serie:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

Resistenze in parallelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

La resistenza equivalente di più resistenze in serie è maggiore di ciascuna delle resistenze in serie.

La resistenza equivalente di più resistenze in parallelo è minore di ciascuna delle resistenze in parallelo.

Per i condensatori la situazione è rovesciata!

Condensatori in serie:

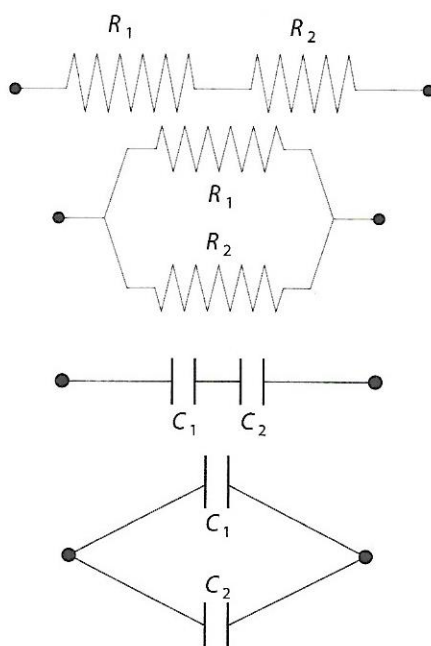
$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Condensatori in parallelo:

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

La capacità equivalente di più capacità in parallelo è maggiore di ciascuna delle capacità in parallelo.

La capacità equivalente di più capacità in serie è minore di ciascuna delle capacità in serie.





Tra due morsetti A e B di un circuito elettrico sono collegate in parallelo tre resistenze, due da $200\ \Omega$ e una da $100\ \Omega$.

Quanto vale la resistenza equivalente totale tra A e B?

Date tre resistenze R_1 , R_2 e R_3 collegate in parallelo tra loro, la resistenza equivalente del sistema è legata alle singole resistenze dalla relazione:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Sostituendo i valori si ottiene:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{200\ \Omega} + \frac{1}{200\ \Omega} + \frac{1}{100\ \Omega} = \frac{4}{200\ \Omega} = \frac{1}{50\ \Omega} \Rightarrow R_{eq} = 50\ \Omega$$



Si hanno a disposizione quattro condensatori uguali ciascuno di capacità $100\ \mu\text{F}$.

Combinandoli in modo opportuno è possibile ottenere una capacità equivalente pari a $25\ \mu\text{F}$?

Se sì, in quale modo?

Se n condensatori sono collegati in parallelo, la capacità equivalente è pari a:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Se n condensatori sono collegati in serie, la capacità equivalente è data da:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Il quesito chiede di trovare una capacità equivalente inferiore alle capacità dei singoli condensatori. Sicuramente, quindi, i quattro condensatori non devono essere collegati in parallelo, altrimenti la capacità equivalente sarebbe uguale a $400\ \mu\text{F}$.

Se i condensatori vengono collegati in serie, la capacità totale diventa pari a:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{100\ \mu\text{F}} + \frac{1}{100\ \mu\text{F}} + \frac{1}{100\ \mu\text{F}} + \frac{1}{100\ \mu\text{F}} = \frac{1}{25\ \mu\text{F}} \Rightarrow C_{eq} = 25\ \mu\text{F}$$

Quindi per avere una capacità equivalente pari a $25\ \mu\text{F}$ è necessario collegare i quattro condensatori in serie.

10.4.2 | Analisi dei circuiti elettrici e leggi di Kirchhoff

Il problema che si può presentare è il seguente: dati uno o più generatori con alcuni elementi di circuito variamente connessi tra loro, si chiede di determinare quali sono le correnti che li attraversano e quanto valgono le differenze di potenziale ai loro capi.

Per la risoluzione di tale problema è necessario tenere presente alcune regole, in parte già viste in precedenza, che vengono ora elencate per comodità.

- Due *elementi* sono collegati *in serie* quando sono attraversati dalla stessa intensità di corrente, mentre sono collegati *in parallelo* quando partono dallo stesso nodo e si chiudono sullo stesso nodo (ai loro capi vi è la stessa differenza di potenziale).
- I fili conduttori che collegano tra loro gli elementi del circuito hanno resistenza nulla.
- Due punti che si trovano collegati da un filo, senza che altri elementi del circuito siano posti tra i due, hanno lo stesso potenziale.
- Ogni linea chiusa all'interno del circuito prende il nome di *maglia*.

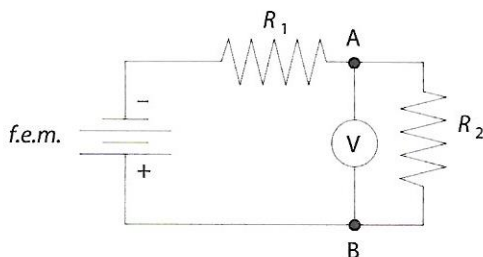
Si utilizzano anche le due **leggi di Kirchhoff**:

1. in ogni *nodo* del circuito, la somma delle correnti entranti deve essere uguale alla somma delle correnti uscenti.
2. la somma algebrica delle forze elettromotrici contenute in una maglia è uguale alla somma delle differenze di potenziale ai capi di ciascuno degli elementi della maglia.

Di seguito viene fornito un esempio di circuito elettrico nel quale si devono determinare le correnti e le differenze di potenziale presenti.



Si trovi la d.d.p. tra i punti A e B del circuito rappresentato, sapendo che la forza elettromotrice del generatore è di 10 V, $R_1 = 100 \Omega$ e $R_2 = 100 \Omega$.



Si ha $\Delta V_{AB} = R_2 i$, dove i è l'intensità di corrente che attraversa la resistenza R_2 . Applicando la seconda legge di Kirchhoff (il circuito è una *maglia*) si ottiene:

$$f.e.m. = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i \Rightarrow f.e.m. = (R_1 + R_2) \cdot i \Rightarrow i = \frac{f.e.m.}{R_1 + R_2}$$

$$\Delta V_{AB} = R_2 \cdot \frac{f.e.m.}{R_1 + R_2}$$

Inserendo i valori numerici si ottiene:

$$\Delta V_{AB} = 100 \Omega \cdot \frac{10 \text{ V}}{200 \Omega} = 5 \text{ V}$$

10.5 | Corrente elettrica nei liquidi e nei gas

L'acqua distillata non conduce elettricità (è un isolante), perché non contiene anioni (ioni positivi) e cationi (ioni negativi); diventa però conduttrice quando contiene ioni che fungono da veicoli trasportatori di carica (è questo il caso dell'acqua non distillata).

Elettrolita: sostanza che in acqua si dissocia elettroliticamente e la rende conduttrice.

La **conducibilità di una soluzione** cresce al crescere della concentrazione dell'elettrolita forte¹ presente in soluzione e cresce al crescere della mobilità degli ioni presenti in soluzione.



I liquidi non sono conduttori ohmici: per essi non valgono le leggi di Ohm.

I gas conducono solo se sono ionizzati. La ionizzazione di un gas si ottiene bombardandolo con agenti ionizzanti: radiazioni elettromagnetiche (raggi X), corpuscoli veloci (elettroni o particelle α). Come nei liquidi, anche nei gas la conducibilità dipende dalla concentrazione degli ioni e dalla loro mobilità.



I gas non sono conduttori ohmici: per essi non valgono le leggi di Ohm.

I gas e i liquidi sono perciò anche detti **conduttori di seconda specie**.

Il vuoto non conduce la corrente elettrica: se però, all'interno di una ampolla contenente un gas molto rarefatto, si applica una differenza di potenziale elevata, si osserva il passaggio di elettroni liberi. I **raggi catodici** sono elettroni emessi dal catodo (elettrodo negativo) che si propagano nel gas rarefatto con velocità elevata (circa $1/3$ della velocità della luce).

1. Per elettrolita forte si intende una sostanza che in soluzione è totalmente dissociata negli ioni che la costituiscono. Un elettrolita debole in soluzione è dissociato solo parzialmente.