CSC

Centro Studi Colombo

Elettricità

8 ELETTRICITÀ

8.1 Elettrizzazione

Materiali come l'ambra o il vetro, quando vengono sfregati con un panno di lana, acquistano la proprietà di attirare corpi leggeri (come pezzetti di carta). Questo fenomeno è noto come **elettrizzazione**.

8.2 Carica elettrica

Lo stato di elettrizzazione di un corpo è attribuito alla **carica elettrica**. La carica elettrica può essere di due tipi: positiva e negativa. Cariche dello stesso segno si respingono, mentre cariche di segno opposto si attraggono. L'unità di misura della carica elettrica nel Sistema Internazionale è il *coulomb* (simbolo C). Per convenzione la carica elettrica è vista come una grandezza derivata dall'intensità di **corrente elettrica**. Le sue dimensioni pertanto sono: $[Q] = [i \cdot T]$ avendo indicato con i le dimensioni della grandezza **intensità di corrente elettrica**.

Tutte le cariche elettriche si presentano come multipli interi della carica elementare $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C associata all'elettrone $(-e)$ e al protone $(+e)$.

8.3 Principio di conservazione della carica elettrica

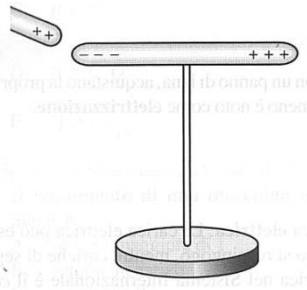
L'elettrizzazione non è il risultato della creazione di carica, ma soltanto del trasferimento della carica da un corpo ad un altro. I due corpi strofinati si caricano: quello che cede elettroni si carica positivamente, mentre quello che li acquista si carica negativamente. Questo si traduce nel **principio di conservazione della carica**: durante qualsiasi fenomeno, la carica totale posseduta da un sistema isolato è costante.

8.4 Conduttori, isolanti e semiconduttori

L'elettrizzazione prodotta in un corpo (ad esempio per strofinio, producendo cessione o acquisto di elettroni), si può comunicare ad un altro corpo per contatto. Le sostanze in cui l'elettrizzazione rimane confinata sono chiamate **isolanti** (o **dielettrici**); le sostanze, invece, in cui l'elettrizzazione non resta localizzata sono detti **conduttori.** Nei conduttori le cariche elettriche sono libere di muoversi: nel caso di conduttori metallici le cariche libere di muoversi sono gli elettroni; in un liquido e in un gas possono invece partecipare alla conduzione sia gli ioni positivi che gli ioni negativi. Negli isolanti, al contrario, le cariche elettriche sono piuttosto vincolate e poco libere di muoversi. I **semiconduttori** sono materiali che si comportano come isolanti a temperature molto basse, mentre a temperatura ambiente conducono cariche di segno positivo o negativo.

8.5 Induzione elettrostatica

L'**induzione elettrostatica** è il fenomeno che avviene quando si avvicina un corpo elettrizzato ad un conduttore scarico. Se, per esempio, il corpo è elettrizzato positivamente, gli elettroni del conduttore risentono dell'attrazione della carica elettrica positiva e, liberi di muoversi, si spostano verso il corpo carico. Fintanto che il corpo elettrizzato, carico positivamente, ed il conduttore non vengono posti a contatto, il conduttore rimane neutro ma al suo interno si è indotta una ridistribuzione delle cariche, ovvero un addensamento di cariche negative verso il corpo carico positivamente ed un addensamento di cariche positive verso la parte opposta (Fig. 8.1).



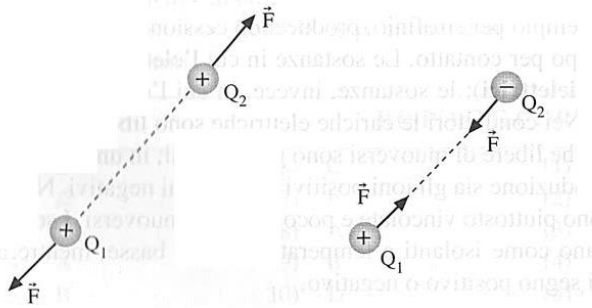
❒ ***Figura 8.1*** *Fenomeno dell'induzione elettrostatica.*

8.6 Legge di Coulomb

Secondo la **legge di Coulomb** la forza $\vec{F}$ di interazione tra due cariche elettriche Q_1 e Q_2 poste a distanza r (Fig. 8.2) ha *modulo* pari a:

$$\boxed{F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}} \qquad (8.1)$$

dove k dipende dalla natura del mezzo in cui le cariche sono immerse. Quando le due cariche sono nel vuoto, $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8{,}99 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ dove ε_0 è la **costante dielettrica** del vuoto (o permittività del vuoto):



❒ ***Figura 8.2*** *Forza di interazione tra cariche elettriche.*

$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12} \dfrac{C^2}{N \cdot m^2}$. Le sue dimensioni sono: $[\varepsilon_0] = [L^{-3} \cdot M^{-1} \cdot T^4 \cdot i^2]$

La *direzione* della forza $\vec{F}$ è lungo la congiungente Q_1 e Q_2 ed il suo *verso* dipende dal segno delle cariche elettriche: la forza è attrattiva se Q_1 e Q_2 hanno segno opposto ed è repulsiva se le due cariche hanno lo stesso segno.

Quando le due cariche elettriche Q_1 e Q_2 sono poste in un mezzo, e non nel vuoto, k vale:

$$\boxed{k = \frac{1}{4\pi\varepsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}} \tag{8.2}$$

dove ε, costante dielettrica del mezzo, è: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, essendo ε_r la costante dielettrica relativa del mezzo rispetto al vuoto. Per qualsiasi mezzo vale $\varepsilon_r \geq 1$.

La costante dielettrica del mezzo ε ha le stesse dimensioni di ε_0, mentre ε_r è adimensionale.

8.7 Campo elettrico

Una carica elettrica posta in un punto dello spazio crea nello spazio circostante un **campo elettrico**. Per mettere in evidenza tale campo è necessario utilizzare una **carica esploratrice** q, avente per convenzione segno positivo. Il vettore campo elettrico è definito come il rapporto tra la forza elettrostatica a cui è soggetta la carica esploratrice q nel punto in cui è posizionata e la carica stessa:

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}} \tag{8.3}$$

La direzione ed il verso di $\vec{E}$ coincidono con la direzione ed il verso di $\vec{F}$.

L'unità di misura del campo elettrico nel Sistema Internazionale è $\dfrac{newton}{coulomb}\left(\dfrac{N}{C}\right)$ oppure $\dfrac{volt}{metro}\left(\dfrac{V}{m}\right)$ (§ 8.13, sul lavoro compiuto dalle forze del campo elettrico) e le sue dimensioni: $[E] = [M \cdot L \cdot T^{-3} \cdot i^{-1}]$.

8.8 Campo elettrico generato da una carica puntiforme

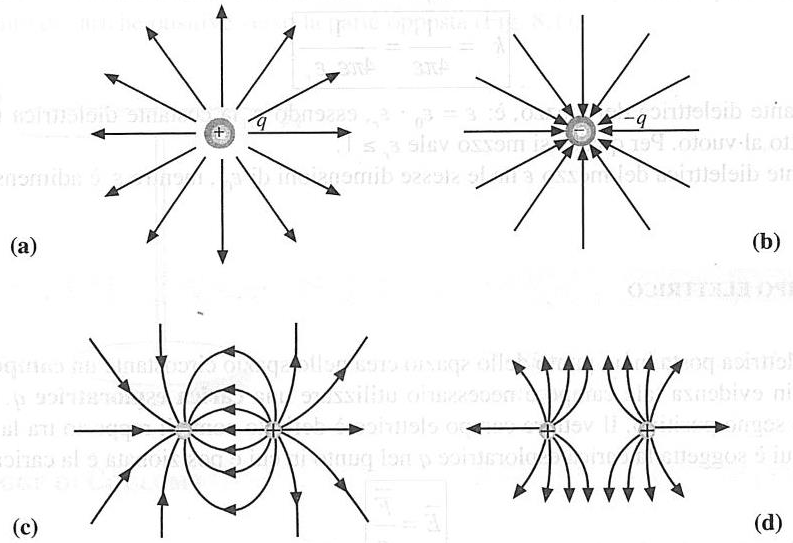
L'**intensità del campo elettrico generato da una carica elettrica puntiforme** Q si ricava a partire dalla definizione di campo elettrico e dalla legge di Coulomb, come:

$$\boxed{E = \frac{F}{q} = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \cdot \frac{1}{q} = k \cdot \frac{Q}{r^2}} \tag{8.4}$$

Il campo elettrico in un punto dello spazio non dipende quindi dalla carica esploratrice q, ma solo dalla carica generatrice Q, dalla distanza del punto dalla carica Q, e dal mezzo (tramite il fattore k).

8.9 Linee di forza del campo elettrico

Il campo elettrico può venire rappresentato graficamente mediante **linee di forza**, ossia linee continue che in ogni punto sono tangenti al vettore campo elettrico $\vec{E}$. Le linee di forza del campo elettrico sono convenzionalmente uscenti dalle cariche elettriche positive ed entranti nelle cariche elettriche negative (Fig. 8.3). Le linee di forza del campo elettrico non possono intersecarsi poiché nell'eventuale punto di intersezione $\vec{E}$ avrebbe due diverse direzioni contemporaneamente.



❒ ***Figura 8.3*** *Linee di forza di un campo elettrico generato da una carica puntiforme.* ***(a)*** *Carica positiva;* ***(b)*** *Carica negativa. Linee di forza del campo elettrico generato da due cariche puntiformi di uguale intensità.* ***(c)*** *Segno opposto;* ***(d)*** *Stesso segno.*

8.10 Carattere conservativo del campo elettrostatico

Il campo elettrico generato da cariche in quiete non varia nel tempo e si dice **campo elettrostatico**. Il campo elettrostatico è un **campo conservativo** (§ 4.4), ovvero il lavoro compiuto dalle forze del campo per portare una carica elettrica da una posizione iniziale ad una posizione finale non dipende dal percorso seguito ma solamente dalle posizioni iniziale e finale. Solo campi di forza conservativi consentono di definire l'energia potenziale come funzione della posizione nel campo (§ 4.5).

8.11 Energia potenziale elettrica

L'**energia potenziale elettrica** E_P di una carica elettrica q all'interno di un campo elettrico è una funzione della posizione della carica, tale che la differenza tra il suo valore nella posizione iniziale A e quello nella posizione finale B è uguale al lavoro compiuto dalle forza del campo per spostare la carica da A a B:

$$\boxed{E_{P_A} - E_{P_B} = L_{A \to B}} \tag{8.5}$$

ovvero $L_{A \to B} = -\Delta E_P$ dove ΔE_P è la differenza tra l'energia potenziale nella posizione B e l'energia potenziale nella posizione A. L'unità di misura dell'energia potenziale elettrica è la stessa del lavoro (come per l'energia potenziale gravitazionale §4.5). Nel Sistema Internazionale è il *joule*, dimensione: $[E_P] = [M \cdot L^2 \cdot T^{-2}]$.

All'energia potenziale è convenzionalmente attribuito il valore zero per una distanza infinita dalla carica Q che crea il campo: $E_{P_\infty} = 0$.

L'energia potenziale elettrica associata ad una carica esploratrice q posta a distanza r dalla carica generatrice Q è data da:

$$\boxed{E_P = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r}} \tag{8.6}$$

8.12 Potenziale elettrico

Il **potenziale elettrico** in un punto M del campo elettrico è definito come il rapporto tra l'energia potenziale elettrica di una carica elettrica in M e la carica stessa:

$$\boxed{V_M = \frac{E_{P_M}}{q}} \tag{8.7}$$

Nel caso di un campo elettrico generato da una carica Q, il potenziale elettrico in un punto a distanza r dalla carica generatrice Q è dato da:

$$\boxed{V_M = \frac{E_{P_M}}{q} = k \cdot \frac{Q}{r}} \tag{8.8}$$

Il potenziale elettrico in un punto dello spazio non dipende quindi dalla carica q che si trova in quel punto, ma solo dalla carica generatrice Q, dalla posizione del punto nello spazio e dalla costante dielettrica del mezzo (tramite il fattore k).

L'unità di misura del potenziale elettrico è il $volt = \frac{joule}{coulomb}$ $\left(1V = 1\frac{J}{C}\right)$ e le sue dimensioni sono: $[V] = [M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot i^{-1}]$

8.13 Differenza di potenziale elettrico e lavoro delle forze elettriche

Dato un campo elettrico e due punti nello spazio A e B, se V_A e V_B sono i valori del potenziale elettrico rispettivamente in A e in B, la **differenza di potenziale** (d.d.p.) tra A e B (o differenza di tensione tra A e B) $\Delta V = V_B - V_A$ è il lavoro, cambiato di segno, compiuto dal campo elettrico per portare una carica elettrica unitaria e positiva q dal punto A al punto B. Infatti usando le definizioni di potenziale e di energia potenziale si ha:

$$V_B - V_A = \frac{E_{P_B}}{q} - \frac{E_{P_A}}{q} = -\frac{L_{A \to B}}{q} \tag{8.9}$$

da cui:

$$\boxed{\Delta V = V_B - V_A = -\frac{L_{A \to B}}{q}} \tag{8.10}$$

Vi è una relazione fra campo elettrico e differenza di potenziale, sulla base della relazione fra lavoro e differenza di potenziale ($L = -q \cdot \Delta V$). Ad esempio nel caso semplificato (forza e spostamento nella stessa direzione e verso) in cui il lavoro è $L = F \cdot \Delta s = q \cdot E \cdot \Delta s$ dove Δs è lo spostamento della carica q nel campo uniforme $\vec{E}$, si ottiene $-q\Delta V = q\,E\Delta s$ da cui:

$$\boxed{E = -\frac{\Delta V}{\Delta s}} \tag{8.11}$$

Per l'unità di misura di E nel Sistema Internazionale, secondo la relazione 8.11, può essere utilizzato il $\frac{volt}{metro}$ oltre al $\frac{newton}{coulomb}$ (vedi §8.7). Vale che $1\frac{N}{C} = 1\frac{V}{m}$.

8.14 L'elettronvolt

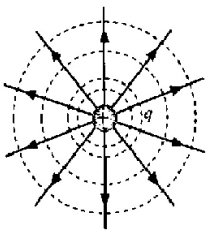
L'**elettronvolt** (eV) è una unità di misura dell'energia che viene spesso usata per descrivere fenomeni su scala atomica. Un elettronvolt corrisponde all'energia potenziale di una carica elementare ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C) sottoposta ad una differenza di potenziale di 1 volt.

$$1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1\text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

8.15 Superfici equipotenziali

Le **superfici equipotenziali** di un campo elettrico sono le superfici i cui punti si trovano tutti allo stesso potenziale. Il lavoro compiuto dalle forze del campo elettrico per spostare una carica elettrica q tra due punti qualsiasi (relazione 8.9) di una superficie equipotenziale è nullo in quanto $\Delta V = 0$.

Le superfici equipotenziali sono sempre ortogonali alle linee del campo elettrico. Nel caso di campo elettrico generato da una carica puntiforme, le superfici equipotenziali sono costituite da superfici sferiche centrate sulla carica (Fig. 8.4).



❒ ***Figura 8.4*** *Superfici equipotenziali di un campo elettrico generato da una carica puntiforme.*

8.16 Flusso del vettore campo elettrico

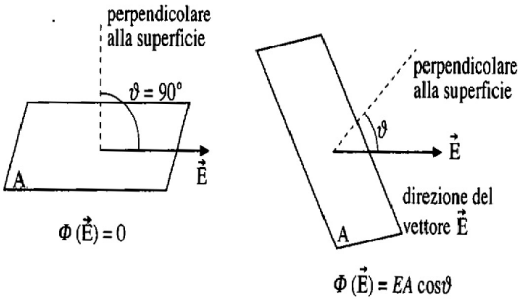
Per un campo elettrico $\vec{E}$ uniforme e una superficie piana perpendicolare al campo elettrico di area A, si definisce **flusso del vettore campo elettrico** attraverso la superficie il prodotto del modulo di $\vec{E}$ per l'area A:

$$\boxed{\Phi(\vec{E}) = E \cdot A} \tag{8.12}$$

Nel caso in cui la superficie non sia perpendicolare ad $\vec{E}$ (Figura 8.5) il flusso del vettore campo elettrico si calcola come:

$$\boxed{\Phi(\vec{E}) = E \cdot A \cdot \cos\vartheta} \tag{8.13}$$

dove ϑ è l'angolo fra il vettore $\vec{E}$ e la perpendicolare alla superficie. Per $\vartheta = 0$ il campo elettrico $\vec{E}$ è perpendicolare alla superficie, mentre per $\vartheta = 90°$ il campo elettrico $\vec{E}$ è parallelo alla superficie ed in questo caso il flusso è nullo.



❒ ***Figura 8.5*** *Flusso del vettore campo elettrico attraverso la superficie di area A nel caso in cui questa non sia perpendicolare ad $\vec{E}$.*

8.17 Teorema di Gauss

Il **teorema di Gauss** afferma che, nel vuoto, il flusso del campo elettrostatico attraverso una qualunque superficie chiusa S è dato dal rapporto tra la somma algebrica Q delle cariche contenute all'interno della superficie e la costante dielettrica del vuoto ε_0:

$$\boxed{\Phi(\vec{E}) = \frac{Q}{\varepsilon_0}} \tag{8.14}$$

Se all'interno della superficie chiusa S non vi sono cariche elettriche, il flusso sarà nullo.

Dal teorema di Gauss si possono ricavare importanti proprietà valide per i conduttori:

1. Il campo elettrico all'interno di un conduttore carico è nullo.
2. Tutti i punti di un conduttore, che si trova in equilibrio elettrostatico, hanno lo stesso valore del potenziale elettrico. Tale valore è detto quindi potenziale del conduttore.
3. In un conduttore la carica elettrica si distribuisce sulla superficie .
4. Nei conduttori non sferici, la carica elettrica si concentra maggiormente nelle regioni dove la curvatura è maggiore (ad esempio in prossimità di una zona appuntita di un conduttore carico si può produrre un campo elettrico molto intenso).

8.18 Capacità elettrica

Se ad un conduttore si fornisce una carica Q, questo si porta ad un potenziale V che è tanto più elevato quanto più è grande la carica fornita. La capacità di un conduttore di accumulare cariche dipende solo dalle caratteristiche geometriche del conduttore e dalle caratteristiche fisiche del mezzo in cui si trova.

La **capacità elettrica di un conduttore** è definita come rapporto tra la carica elettrica del conduttore ed il potenziale a cui esso si trova:

$$\boxed{C = \frac{Q}{V}} \tag{8.15}$$

L'unità di misura della capacità elettrica nel Sistema Internazionale è il $farad = \frac{coulomb}{volt}$, le sue dimensioni sono: $[C] = [M^{-1} \cdot L^{-2} \cdot T^{4} \cdot i^{2}]$.

8.19 Il condensatore e la capacità del condensatore

Un **condensatore** è un sistema costituito da due conduttori affacciati e isolati fra loro, detti **armature del condensatore**. In condizione di induzione elettrostatica completa, se Q è la carica accumulata su un conduttore, sul secondo conduttore si avrà una carica pari a $-Q$.

Si definisce **capacità elettrica del condensatore** il rapporto tra il valore assoluto della carica accumulata Q sulle armature e la differenza di potenziale ΔV fra i due conduttori:

$$\boxed{C = \frac{Q}{\Delta V}} \tag{8.16}$$

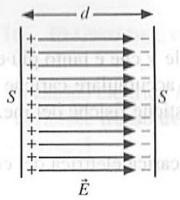
Tale relazione ci mostra che la differenza di potenziale fra i due conduttori è proporzionale alla carica Q posseduta da ciascuno di essi. La capacità di un condensatore dipende solo dalle caratteristiche geometriche del condensatore stesso e dalla costante dielettrica ε del mezzo interposto tra i due conduttori ($\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, §8.6).

Un tipico esempio di condensatore è rappresentato dal **condensatore a facce piane e parallele** (Fig. 8.6). Esso è costituito da due superfici conduttrici piane di area S disposte parallelamente tra loro ad una distanza d. Si può dimostrare che per un condensatore a facce piane e parallele la capacità elettrica C è data da:

$$\boxed{C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}} \tag{8.17}$$

Nel caso in cui le armature di un condensatore a facce piane e parallele possono essere considerate molto grandi rispetto alla loro distanza, il campo elettrico all'esterno delle armature è nullo mentre il campo elettrico nella regione tra le armature è uniforme. Il vettore campo elettrico fra le due armature è diretto ortogonalmente alle armature e il suo verso va dall'armatura carica positivamente a quella carica negativamente. Il suo modulo vale:

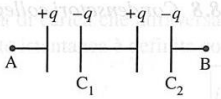
$$\boxed{E = \frac{\Delta V}{d}} \tag{8.18}$$



❒ ***Figura 8.6*** *Condensatore a facce piane e parallele.*

8.20 Collegamento in serie tra condensatori

In un **collegamento in serie tra due condensatori** di capacità elettrica C_1 e C_2 (Fig. 8.7), le armature di ciascun condensatore sono caricate con la medesima quantità di carica elettrica q.



❒ ***Figura 8.7*** *Condensatori collegati in serie.*

La differenza di potenziale ΔV fra A e B si ripartisce tra ciascun condensatore secondo la relazione:

$$\boxed{\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2} \tag{8.19}$$

con $\Delta V_1 = \dfrac{q}{C_1}$ e $\Delta V_2 = \dfrac{q}{C_2}$. Pertanto:

$$\Delta V = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} = q \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \tag{8.20}$$

Considerando che per la **capacità equivalente** C_{eq} per due condensatori collegati in serie vale $\Delta V = \dfrac{q}{C_{eq}}$, si ha:

$$\boxed{\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} \tag{8.21}$$

La capacità equivalente di più condensatori in serie è tale che il suo inverso è la somma degli inversi delle singole capacità. Notare che la capacità equivalente per condensatori in serie è minore di ciascuna delle capacità dei singoli condensatori (es. $C_1 = 1\ \mu F$, $C_2 = 2\ \mu F$, $C_{eq} = 0{,}66\ \mu F$).

8.21 Collegamento in parallelo tra condensatori

In un **collegamento in parallelo tra due condensatori** di capacità elettrica C_1 e C_2 (Fig. 8.8), tra le armature di ciascun condensatore vi è la stessa differenza di potenziale $\Delta V = V_B - V_A$ mentre la carica elettrica totale è data dalla somma delle cariche su ciascun condensatore:

$$\boxed{q = q_1 + q_2} \tag{8.22}$$

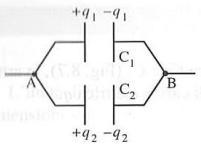
La capacità equivalente è:

$$C_{eq} = \frac{q}{\Delta V} = \frac{q_1 + q_2}{\Delta V} \tag{8.23}$$

ovvero:

$$\boxed{C_{eq} = C_1 + C_2} \tag{8.24}$$

La capacità equivalente di più condensatori in parallelo è la somma di ciascuna delle capacità dei singoli condensatori in parallelo (es. $C_1 = 1\ \mu F$, $C_2 = 2\ \mu F$, $C_{eq} = 3\ \mu F$).



❒ ***Figura 8.8*** *Condensatori collegati in parallelo.*

8.22 Lavoro per caricare un condensatore ed energia accumulata in un condensatore

Il lavoro compiuto per portare una singola carica q da un'armatura all'altra del condensatore, che già si trovano alla differenza di potenziale ΔV, è pari a:

$$\boxed{L = q \cdot \Delta V} \tag{8.25}$$

Questo lavoro è l'opposto del lavoro eseguito dalle forze elettriche che vale $L = -q \cdot \Delta V$ (vedi §8.13).

Il lavoro L totale che bisogna compiere per caricare le armature di un condensatore, inizialmente scarico, con una carica elettrica Q è dato da:

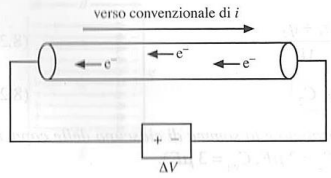
$$\boxed{L = \frac{1}{2} Q\,\Delta V = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \Delta V^2} \tag{8.26}$$

dove ΔV è la differenza di potenziale tra le armature e C è la capacità elettrica del condensatore. Questo lavoro resta immagazzinato nel condensatore sotto forma di energia elettrostatica accumulata.

8.23 Corrente elettrica

Applicare una differenza di potenziale agli estremi di un conduttore produce un campo elettrico lungo il conduttore che genera un flusso di cariche (Fig. 8.9).

In un conduttore metallico gli elettroni sono le uniche cariche elettriche libere di muoversi per effetto del campo elettrico e gli elettroni si muovono dalla regione a potenziale elettrico minore verso quella con potenziale elettrico maggiore. Questo movimento ordinato di elettroni costituisce una **corrente elettrica**. Per convenzione *il verso della corrente elettrica è scelto opposto rispetto al verso degli elettroni in movimento, quindi dalla zona a potenziale maggiore alla zona a potenziale minore.*



❒ ***Figura 8.9*** *Verso della corrente elettrica in un conduttore.*

Si definisce **intensità di corrente elettrica** i, che fluisce in un conduttore, il rapporto tra la quantità di carica elettrica ΔQ che attraversa una generica sezione di un conduttore nell'intervallo di tempo Δt e l'intervallo stesso:

$$\boxed{i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}} \tag{8.27}$$

Se la quantità di carica che attraversa la sezione del conduttore non è costante nel tempo, l'intensità di corrente istantanea è definita come:

$$\boxed{i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}} \tag{8.28}$$

L'intensità di corrente elettrica è una grandezza fondamentale e quindi la sua dimensione fisica è $[i]$.

L'unità di misura della intensità di corrente nel Sistema Internazionale è l'*ampere* (simbolo A). L'unità di misura della carica è legata all'unità di misura dell'intensità di corrente dalla relazione: $1\ C = 1\ A \cdot 1\ s$.

8.24 Legge di Ohm

La legge di Ohm è spesso distinta in prima e seconda legge di Ohm.

Un conduttore metallico filiforme, ai cui estremi è applicata una differenza di potenziale costante, è percorso da una corrente continua. La **prima legge di Ohm** afferma che l'intensità di corrente elettrica i in un conduttore metallico, purché non intervengano variazioni nelle condizioni fisiche del conduttore, è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale ΔV presente ai capi del conduttore stesso:

$$\boxed{\Delta V = i \cdot R} \tag{8.29}$$

La costante di proporzionalità R prende il nome di **resistenza elettrica**. La resistenza elettrica ha un valore che dipende dalle condizioni fisiche del conduttore, dalla sostanza costituente il conduttore e dalle sue caratteristiche geometriche.

L'unità di misura della resistenza elettrica nel Sistema Internazionale è l'$ohm = \dfrac{volt}{ampere}$ $\left(1\Omega = 1\dfrac{V}{A}\right)$ e le sue dimensioni: $[R] = \left[M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot i^{-2}\right]$.

Si usa dire che la corrente fluisce in regime ohmico per indicare la condizione in cui vale la prima legge di Ohm.

La **seconda legge di Ohm** esprime che in un filo conduttore metallico la resistenza elettrica R è direttamente proporzionale alla lunghezza l del filo ed inversamente proporzionale alla sua sezione S:

$$\boxed{R = \rho \cdot \frac{l}{S}} \tag{8.30}$$

La costante di proporzionalità ρ prende il nome di **resistività elettrica** e dipende dal materiale e dalla temperatura a cui si trova.

L'unità di misura della resistività elettrica ρ nel Sistema Internazionale è $ohm \cdot metro$ e le sue dimensioni: $[\rho] = \left[M \cdot L^3 \cdot T^{-3} \cdot i^{-2}\right]$.

L'inverso della resistività elettrica prende il nome di **conducibilità elettrica**:

$$\boxed{\sigma = \frac{1}{\rho}} \tag{8.31}$$

I conduttori sono caratterizzati da valori elevati di conducibilità elettrica quindi da una bassa resistività (ad esempio la resistività dell'argento ad una temperatura di 20°C è pari a $\rho = 1{,}5 \cdot 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$). Nei conduttori la resistività aumenta all'aumentare della temperatura.

I dielettrici (o isolanti) sono caratterizzati da bassi valori di conducibilità e quindi elevati valori di resistività (ad esempio la resistività del vetro ad una temperatura di 20°C è pari a $\rho = 10^{11}$ $\Omega \cdot m$).

Nei semiconduttori la resistività diminuisce all'aumentare della temperatura.

8.25 Effetto Joule

L'**effetto Joule** è l'effetto di riscaldamento di un conduttore metallico a seguito del passaggio di corrente elettrica. Gli elettroni in moto attraverso un conduttore perdono energia nelle collisioni con gli altri elettroni. L'energia persa dagli elettroni è acquistata dal conduttore sotto forma di calore. L'energia termica sviluppata è pari al lavoro elettrico $L = q \cdot \Delta V$

La potenza dissipata per effetto Joule è pari a:

$$\boxed{P = \frac{L}{\Delta t} = \frac{q \cdot \Delta V}{\Delta t} = \Delta V \cdot i = \frac{\Delta V^2}{R} = R \cdot i^2} \tag{8.32}$$

L'unità di misura della potenza è il $watt = \dfrac{joule}{secondo}$ $\left(1W = 1\dfrac{J}{s}\right)$.

8.26 Generatore elettrico, pila, batteria

In un conduttore metallico ai cui estremi è applicata una differenza di potenziale fluisce una corrente elettrica, ma affinché la corrente continui a fluire è necessario che sia mantenuta questa differenza di potenziale, ovvero è necessario che sia creata e mantenuta una forza elettromotrice di elettroni.

Il **generatore elettrico** è un dispositivo in grado di creare e mantenere una separazione di cariche positive e negative, ovvero di mantenere una differenza di potenziale tra due elettrodi metallici, ed è per questo detto anche generatore di **forza elettromotrice** (f.e.m.). Pile e batterie sono esempi di generatori di f.e.m.

La forza elettromotrice è la differenza di potenziale ai capi del generatore a circuito aperto ed è definita come rapporto tra l'energia erogata dal generatore e la carica posta in movimento. La forza elettromotrice, nonostante il termine "forza", non ha le dimensioni fisiche di una forza. L'unità di misura della f.e.m. è la stessa del potenziale elettrico: volt.

La **resistenza interna** è la resistenza che la corrente incontra passando all'interno del generatore stesso, e si misura in ohm.

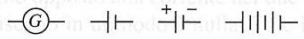
8.27 Circuito elettrico

In generale un **circuito elettrico** è l'insieme di elementi passivi (resistenze e condensatori) e di generatori elettrici. Questi elementi sono uniti tra loro in modo tale che partendo da un punto qualsiasi e seguendo conduttori diversi, si può ritornare al punto di partenza.

Si definisce **maglia** di un circuito ogni percorso chiuso all'interno di un circuito elettrico. Un **nodo** è un punto del circuito elettrico in cui confluiscono due o più conduttori del circuito. Un ramo di un circuito elettrico è un qualunque conduttore che collega due nodi.

I seguenti simboli sono usati nei circuiti per indicare i diversi componenti:

- generatore di corrente continua:



- generatore di corrente alternata:

- amperometro

- voltmetro

- resistenza

- condensatore

8.28 Amperometro (o galvanometro)

L'**amperometro** (o **galvanometro**) è uno strumento in grado di misurare la corrente elettrica che circola in un circuito elettrico. Esso deve essere inserito mediante un collegamento in serie al circuito di cui si vuole misurare l'intensità di corrente.

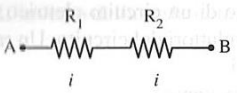
8.29 Voltmetro

Il **voltmetro** è uno strumento in grado di misurare la differenza di potenziale tra due punti qualsiasi di un circuito elettrico. Esso deve essere inserito mediante un collegamento in parallelo al circuito di cui si vuole misurare la d.d.p. Infatti, se fosse inserito in serie, la sua resistenza interna determinerebbe una caduta di potenziale ($\Delta V = i \cdot R$) alterando le condizioni del circuito.

8.30 Collegamento in serie tra resistenze

In un **collegamento in serie tra due resistenze,** R_1 e R_2, (Fig. 8.10) ciascuna resistenza è attraversata dalla stessa corrente i mentre la differenza di potenziale ΔV tra gli estremi A e B è data dalla somma delle differenze di potenziale ΔV_1 e ΔV_2 ai capi di ciascuna resistenza:

$$\boxed{\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2} \tag{8.33}$$



❒ ***Figura 8.10*** *Resistenze collegate in serie.*

La **resistenza equivalente** per due resistenze in serie è:

$$R_{eq} = \frac{\Delta V}{i} = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{i} \tag{8.34}$$

ovvero:

$$\boxed{R_{eq} = R_1 + R_2} \tag{8.35}$$

La resistenza equivalente di più resistenze in serie è la somma delle singole resistenze (es. $R_1 = 2\ \Omega$, $R_2 = 3\ \Omega$, $R_{eq} = 5\ \Omega$).

8.31 Collegamento in parallelo tra resistenze

In un **collegamento in parallelo tra due resistenze,** R_1 e R_2 (Fig. 8.11) la differenza di potenziale ai capi di ciascuna resistenza è identica $\Delta V = V_B - V_A$, mentre la corrente i che entra nel sistema è la somma delle correnti nelle singole resistenze:

$$\boxed{i = i_1 + i_2} \tag{8.36}$$

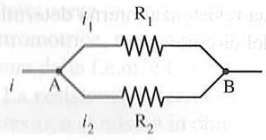
con $i_1 = \dfrac{\Delta V}{R_1}$ e $i_2 = \dfrac{\Delta V}{R_2}$.

Pertanto:

$$i = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} = \Delta V \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{8.37}$$

Considerando che per la resistenza equivalente R_{eq} vale $i = \dfrac{\Delta V}{R_{eq}}$, si ha che la resistenza equivalente di due resistenze in parallelo è:

$$\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \tag{8.38}$$

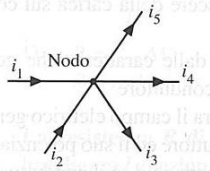


❒ ***Figura 8.11*** *Resistenze collegate in parallelo.*

La resistenza equivalente di più resistenze in parallelo è tale che il suo inverso è la somma degli inversi delle singole resistenze. Notare che la resistenza equivalente per resistenze in parallelo è minore di ciascuna delle resistenze in parallelo $\left(\text{es. } R_1 = 2\ \Omega,\ R_2 = 3\ \Omega,\ \dfrac{1}{R_{eq}} = \dfrac{1}{2} + \dfrac{1}{3} = 0{,}833\ \Omega^{-1},\ R_{eq} = 1{,}2\ \Omega\right)$.

8.32 Leggi di Kirchhoff

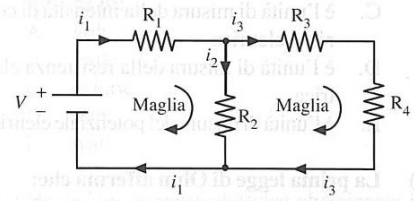
La **prima legge di Kirchhoff** afferma che in ogni nodo (Fig. 8.12) di un circuito elettrico, la somma delle correnti entranti è uguale alla somma delle correnti uscenti. Equivalentemente, attribuendo segno opposto alla corrente nei due versi, si può dire che la somma algebrica delle correnti che confluiscono in un nodo è nulla. Tale legge è una diretta conseguenza del principio di conservazione della carica.



$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 - i_5 = 0$

❒ ***Figura 8.12*** *Prima legge di Kirchhoff.*

La **seconda legge di Kirchhoff** afferma che in ogni maglia (Fig. 8.13) la somma algebrica delle variazioni di potenziale nelle resistenze è uguale a zero, oppure uguale alla d.d.p. del generatore se è presente un generatore in quella maglia. Tale legge è una conseguenza del principio di conservazione dell'energia.



$i_1 R_1 + i_2 R_2 = V$

$i_3 R_3 + i_3 R_4 - i_2 R_2 = 0$

❒ ***Figura 8.13*** *Seconda legge di Kirchhoff.*

8.33 Corrente elettrica nei liquidi

I responsabili della **corrente elettrica nei liquidi** sono gli **anioni** (ioni negativi) e i **cationi** (ioni positivi).

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

8.34 Corrente elettrica nei gas

I responsabili della **corrente elettrica in un gas** sono sia gli ioni positivi che gli ioni negativi. Affinché in un gas avvenga passaggio di corrente elettrica, il gas deve essere ionizzato.

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

VERIFICA

1) Indicare quale tra le seguenti affermazioni è esatta.

A. In un conduttore metallico le cariche elettriche non sono libere di muoversi

B. In un conduttore metallico le cariche elettriche libere di muoversi sono gli elettroni

C. Un conduttore metallico non può subire il fenomeno dell'induzione elettrostatica

D. In un conduttore metallico le cariche elettriche che partecipano alla conduzione sono sia gli ioni positivi che gli ioni negativi

E. I metalli sono degli isolanti

2) Il campo elettrico generato da una carica puntiforme positiva Q:

A. non dipende dalla carica Q

B. dipende linearmente dalla distanza dalla carica Q

C. è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla carica Q

D. non dipende dal mezzo in cui è immersa la carica Q

E. aumenta al crescere della distanza dalla carica Q

3) La costante dielettrica relativa ε_r di un mezzo rispetto al vuoto è sempre:

A. < 1

B. $= 1$

C. ≤ 1

D. < 0

E. ≥ 1

4) Il potenziale elettrico in un punto del campo elettrico:

A. è il rapporto tra l'energia potenziale elettrica di una carica in quel punto e la carica stessa

B. dipende dalla carica che può trovarsi in quello stesso punto

C. è una grandezza vettoriale

D. non dipende dall'intensità del campo elettrico in cui il punto si trova

E. dipende dalla carica esploratrice

5) La capacità elettrica di un conduttore:

A. cresce al crescere della carica sul conduttore

B. non dipende dalle caratteristiche geometriche del conduttore

C. è il rapporto tra il campo elettrico generato dal conduttore ed il suo potenziale

D. è diversa da zero solo se il conduttore è carico

E. è il rapporto tra carica del conduttore e il suo potenziale

6) L'ampere:

A. è l'unità di misura della carica elettrica

B. è l'unità di misura della capacità

C. è l'unità di misura della intensità di corrente elettrica

D. è l'unità di misura della resistenza elettrica

E. è l'unità di misura del potenziale elettrico

7) La prima legge di Ohm afferma che:

A. la carica accumulata sulla superficie di un conduttore è proporzionale al suo potenziale

B. la resistenza R di un conduttore cresce al crescere della differenza di potenziale ΔV applicata ai capi del conduttore.

C. in un filo conduttore la resistenza elettrica è inversamente proporzionale alla lunghezza del filo e direttamente proporzionale alla sua sezione

D. l'intensità di corrente elettrica in un conduttore è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale ΔV ai capi del conduttore stesso

E. l'intensità di corrente elettrica in un conduttore è inversamente proporzionale alla differenza di potenziale ai capi del conduttore

8) Detta i la corrente elettrica che circola in un conduttore e ΔV la differenza di potenziale ai suoi capi, la resistenza del conduttore è esprimibile come:

A. $R = i \cdot \Delta V$

B. $R = \dfrac{i}{\Delta V}$

C. $R = \dfrac{\Delta V}{i}$

D. $R = i^2 \cdot \Delta V$

E. $R = i \cdot \Delta V^2$

9) La resistenza R di un filo conduttore di lunghezza l e sezione S:

A. aumenta all'aumentare di S

B. aumenta all'aumentare di l

C. diminuisce all'aumentare di l

D. dipende da l ma non da S

E. dipende da S ma non da l

10) La potenza dissipata per effetto joule si misura in:

A. volt

B. joule

C. calorie

D. ohm

E. watt

11) Detta i la corrente elettrica che circola in un conduttore di resistenza R e ΔV la differenza di potenziale ai suoi capi, l'energia L dissipata per effetto Joule in un tempo Δt è esprimibile come:

A. $L = R \cdot i^2 \cdot \Delta t$

B. $L = \Delta V \cdot i^2 \cdot \Delta t$

C. $L = R \cdot \Delta V^2 \cdot \Delta t$

D. $L = \dfrac{R \cdot i^2}{\Delta t}$

E. $L = \dfrac{R \cdot \Delta t}{i}$

12) Se si collegano in serie due resistenze:

A. la resistenza equivalente è uguale alla somma delle due resistenze

B. la resistenza equivalente è minore di ciascuna delle due resistenze

C. l'intensità di corrente che circola nelle due resistenze è diversa

D. ai capi delle singole resistenze vi è la stessa differenza di potenziale

E. la resistenza equivalente è minore della resistenza equivalente che otterrei collegando le due resistenze in parallelo

13) Se si collegano in parallelo tre resistenze R_1, R_2 ed R_3, la resistenza equivalente R_{eq} è data da:

A. $R_{eq} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$

B. $R_{eq} = \dfrac{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}$

C. $R_{eq} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}$

D. $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$

E. $R_{eq} = \dfrac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}$

14) Se si collegano in parallelo due condensatori:

A. la capacità equivalente è uguale alla differenza delle due capacità

B. la differenza di potenziale tra le armature è uguale per entrambi i condensatori

C. la capacità equivalente è minore delle singole capacità dei condensatori

D. le armature di ciascun condensatore, anche se di capacità diversa, sono caricate con la medesima quantità di carica elettrica.

E. la capacità equivalente è minore della capacità equivalente che otterrei collegando i due condensatori in serie

15) Il lavoro compiuto dalle forze del campo elettrostatico per portare una carica elettrica da un punto iniziale ad un punto finale:

A. non dipende dal percorso seguito ma solamente dalle posizioni iniziale e finale

B. dipende dalla posizione iniziale ma non da quella finale
C. dipende dalla posizione finale ma non da quella iniziale
D. dipende dal percorso seguito
E. non dipende né dalla posizione iniziale né da quella finale

16) Si consideri nel vuoto una superficie chiusa contenente una carica Q. Il flusso del campo elettrico generato dalla carica attraverso la superficie chiusa è pari a:

A. $\frac{Q}{\varepsilon_0}$

B. $\frac{\varepsilon_0}{Q}$

C. $Q \cdot \varepsilon_0$

D. $\frac{Q^2}{\varepsilon_0}$

E. $\frac{Q}{\varepsilon_0^2}$

17) Si considerino due condensatori di capacità C_1 e C_2 collegati in serie e sia C_{eq} la capacità equivalente. Il legame tra queste capacità è:

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

B. $C_{eq} = C_2 - C_1$

C. $C_{eq} = C_1 - C_2$

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

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

18) L'amperometro è:

A. uno strumento in grado di misurare la differenza di potenziale tra due punti qualsiasi di un circuito elettrico
B. uno strumento in grado di misurare la corrente elettrica che fluisce in un circuito
C. uno strumento che fornisce una f.e.m.
D. l'elemento di un circuito che fornisce corrente elettrica
E. un sistema costituito da due conduttori affacciati e isolati l'uno dall'altro

19) Un condensatore è:

A. uno strumento in grado di misurare la corrente elettrica che circola in un circuito
B. un punto del circuito elettrico in cui confluiscono due o più conduttori
C. un sistema costituito da due conduttori affacciati e isolati l'uno dall'altro
D. un percorso chiuso all'interno di un circuito elettrico
E. un filo conduttore

20) Il lavoro $L_{A \to B}$ che le forze del campo elettrico compiono per portare una carica elettrica q dal punto A (a potenziale V_A) al punto B (a potenziale V_B) è pari a:

A. $L_{A \to B} = q \cdot (V_A - V_B)$

B. $L_{A \to B} = q \cdot (V_B - V_A)$

C. $L_{A \to B} = q \cdot (V_A + V_B)$

D. $L_{A \to B} = -q \cdot (V_A + V_B)$

E. $L_{A \to B} = \frac{q}{V_A - V_B}$