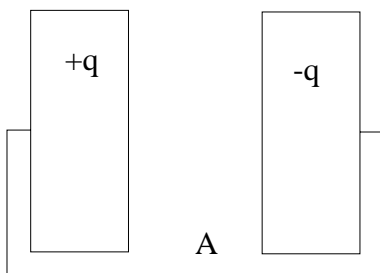


**Unità Didattica N° 25****La corrente elettrica**

- 01) Il problema dell'elettrocinetica**
- 02) La corrente elettrica nei conduttori metallici**
- 03) Circuito elettrico elementare**
- 04) La prima legge di Ohm**
- 05) La seconda legge di Ohm**
- 06) Espressione vettoriale delle due leggi di Ohm**
- 07) Resistenze in serie**
- 08) Il primo principio di Kirchhoff**
- 09) Resistenze in parallelo**
- 10) Shunt**
- 11) Forza elettromotrice**
- 12) La prima legge di Ohm applicata ad un circuito chiuso**
- 13) Reostati**
- 14) Amperometri**
- 15) Voltmetri**
- 16) Effetti principali della corrente elettrica**
- 17) Energia e potenza di una corrente elettrica continua**
- 18) Effetto Joule e sua interpretazione microscopica**

### Il problema dell'elettrocinetica

- L'elettrocinetica è quella parte dell'elettrologia che si occupa dei fenomeni connessi al movimento delle cariche elettriche. Nei capitoli precedenti abbiamo studiato i fenomeni che si manifestano quando le cariche elettriche si trovano in quiete sui conduttori isolati posti nel vuoto o immersi in dielettrici omogenei e indefiniti. In particolare abbiamo evidenziato la fondamentale proprietà che un conduttore carico ( in **equilibrio elettrostatico** ), qualunque ne siano la forma, l'estensione e le condizioni dello spazio circostante, è sempre **equipotenziale**, cioè tra due suoi punti qualsiasi la differenza di potenziale è nulla.
- Vogliamo ora occuparci dei fenomeni che si manifestano quando due conduttori, che si trovano a diverso potenziale, vengono collegati tra loro mediante un terzo conduttore ( per esempio un filo di rame ). All'istante del contatto, i due conduttori ed il filo di rame vengono a costituire un unico conduttore e pertanto si avrà una redistribuzione di cariche, in modo da soddisfare le condizioni di equipotenzialità. In ogni caso , essendo uno dei due conduttori a potenziale più basso dell'altro, si originerà un moto di cariche elettrica da un conduttore verso l'altro lungo il filo che collega i due corpi. Significativa è a tale proposito la seguente esperienza. Si disponga di due conduttori che sono ad un potenziale diverso, per esempio le due armature di un condensatore carico.



Si uniscano tali armature con un filo conduttore A . Si nota che il condensatore si scarica attraverso il filo . Si immagina che le cariche elettriche negative dell'armatura a potenziale più basso attraverso il filo A si siano trasferite sull'altra armatura , Il filo A è percorso da una **corrente elettrica** di brevissima durata . Il conduttore A dicesi **reoforo** . Per convenzione dicesi **verso** o sensò della corrente

elettrica il verso delle cariche positive , cioè il **verso dei potenziali decrescenti** .

- Considereremo **conduttori filiformi** , cioè di sezione piccolissima rispetto alla loro lunghezza . Spesso si dirà << **una corrente elettrica** >> per significare << **un conduttore filiforme percorso da corrente** >>. Il campo  $\vec{E}$  esiste in quanto nel conduttore ( omogeneo ed isoterma ) sono presenti delle differenze di potenziale. Se in un dato conduttore queste sono costanti , il flusso delle cariche elettriche è costante nel tempo e la corrente elettrica ha **intensità costante** ; si dice brevemente che la **corrente è costante o stazionaria** .

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

Se le differenze di potenziale vengono a mancare , il flusso di cariche elettriche cessa quasi contemporaneamente per la resistenza che anche i buoni conduttori offrono al moto delle cariche elettriche .

- La **d.d.p.** tra i poli a **circuito aperto** è misurabile mediante un **elettrometro** e dà la **forza elettromotrice** ( **f.e.m.** ) del generatore di corrente. Un reoforo collegato ai due poli di un generatore di corrente è percorso da **corrente elettrica**. In questo caso un elettrometro collegato ai morsetti della macchina non misura più la **f.e.m.** del generatore ma misura la **d.d.p.** esistente tra i morsetti ( che è la **d.d.p.** esistente agli estremi del reoforo ) che è solo una parte della **f.e.m.** della macchina .
- Si definiscono **correnti di conduzione** le correnti dovute al moto delle cariche elettriche senza trasporto di materia elettrizzata . tali sono le correnti che si originano in un filo conduttore ai cui estremi è applicata una **d.d.p.** Si definiscono **correnti di convezione** le correnti dovute al moto di cariche elettriche mediante il trasporto di materia elettrizzata . Si ha **corrente di convezione** nelle soluzioni elettrolitiche . Le cariche elettriche sono trasportate da ioni positivi e negativi .
- La corrente elettrica può essere classificata rispetto a diversi aspetti .

Rispetto alla **durata**  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Istantanea} \\ \text{Persistente} \end{array} \right.$  rispetto al **verso**  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Continua} \\ \text{Oscillatoria} \end{array} \right.$

rispetto al **mezzo**  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Continua} \\ \text{Oscillatoria} \end{array} \right.$

### La corrente elettrica

- L'**elettrostatica** tratta principalmente le forze che agiscono sulle cariche elettriche quando queste raggiungono la loro posizione di equilibrio ed il moto delle cariche elettriche nello spazio vuoto o riempito di un dielettrico. Adesso vogliamo studiare il moto ordinato delle cariche elettriche in un conduttore quando all'interno di esso viene mantenuto un campo elettrico . Tale moto ordinato costituisce la **corrente elettrica**.
- Ricordiamo che un **conduttore metallico** è costituito da atomi regolarmente distribuiti in un reticolo periodico perfetto ( **reticolo cristallino** ) . La **densità di elettroni liberi** è costante in tutto il volume del conduttore , ma ogni volume elementare ( volume infinitesimo ) deve contenere tante cariche positive quante sono quelle negative , deve cioè rimanere **neutro**. Gli **elettroni liberi** nel conduttore possono essere paragonati agli atomi di un gas. Il conduttore è il recipiente che li contiene. Essi hanno una velocità vettoriale  $\vec{v}$  non nulla, ma la media delle loro velocità vettoriali è

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

nulla: non costituiscono un flusso regolare ed ordinato di cariche elettriche, ma si muovono disordinatamente costituendo la cosiddetta **nube elettronica**.

- Le cariche elettriche libere in un conduttore sono **elettroni di conduzione**, cioè elettroni dell'ultima orbita. Le **cariche elettriche libere** in una sostanza elettrolitica sono costituite da ioni, sia positivi che negativi. Un gas, in particolari condizioni, è anch'esso un **conduttore** le cui cariche libere sono costituite da **ioni positivi, ioni negativi ed elettroni**. Queste cariche libere costituiscono una **corrente elettrica** quando si muovono ordinatamente per effetto di forze esercitate su di esse e generate da un campo elettrico.

- Gli **elettroni liberi** ( elettroni di conduzione ) in un conduttore si muovono caoticamente come le molecole di un gas racchiuso in un recipiente : non vi è moto risultante lungo la direzione del filo. Se consideriamo una sezione di un piano qualsiasi col filo conduttore allora il numero di elettroni che l'attraversano da destra verso sinistra è uguale al numero di elettroni che passano da sinistra verso destra.

- Se colleghiamo il filo metallico agli estremi di una batteria allora in ogni punto del filo si crea un campo  $\vec{E}$  il quale agirà sugli elettroni di conduzione **imprimendo loro un** moto risultante nella direzione di  $-\vec{E}$ . ( Gli **elettroni atomici**, e così i nuclei , sono soggetti all'azione del campo elettrico , ma non vengono accelerati a causa delle forze di legame che vincolano gli elettroni ai nuclei ed i nuclei fra di loro per formare il solido considerato ). ben presto gli urti con le particelle fisse del metallo rallentano gli elettroni liberi o li fermano del tutto , dopo di che gli elettroni di conduzione vengono nuovamente accelerato e così di seguito. Il loro moto risulta una successione di accelerazioni e decelerazioni . Tuttavia essi acquistano una certa **velocità media** ( la cosiddetta **velocità di deriva** ) in direzione opposta a quella del campo elettrico e possiamo supporre che essi si muovano uniformemente con tale velocità. Quando si verifica una situazione del genere si dice che si è stabilita una **corrente elettrica  $i$**  e se attraverso qualunque sezione del conduttore nel

tempo  $t$  passa una carica totale  $q$ , la **corrente** , supposta costante, è :

$$i = \frac{q}{t}$$

$i$  è detta **intensità di corrente** . Se il flusso di carica non è costante nel tempo , la corrente varia nel tempo ed è data da :

$$i = \frac{dq}{dt}$$

In **elettrocinetica** noi considereremo soltanto **correnti costanti** .

- La corrente  $i$  è la stessa per tutte le sezioni di un conduttore , anche se l'area delle sezioni può essere differente nei diversi punti. La **costanza** della corrente elettrica  $i$  segue dalla conservazione

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

della carica elettrica , che nelle condizioni stazionarie da noi considerate, non si accumula né scompare in alcun punto del conduttore. Non vi sono, cioè, né **sorgenti** né **pozzi** di carica elettrica.

- Sebbene nei metalli i **portatori di carica** siano elettroni ( di conduzione ), negli elettroliti o nei conduttori gassosi essi possono essere ioni positivi o ioni negativi o entrambi. E' quindi necessaria una convenzione per definire la direzione di una corrente elettrica dato che in un dato campo le cariche di segno opposto si muovono in direzioni opposte. Allora, per semplicità, facciamo l'ipotesi che tutti i portatori di carica siano positivi e per indicare la corrente disegniamo una freccia nella direzione e nel verso in cui si muoveranno queste cariche. Se i portatori di carica sono negativi, essi si muovono semplicemente nella direzione opposta a quella della freccia che indica la corrente.

- **i** è **grandezza primitiva** ed ha come unità di misura l' **ampere** ; **q** è **grandezza derivata** ed ha come unità di misura il **coulomb**

$$\{q\} = \text{coulomb} = C = \{i\} \cdot \{t\} = \text{ampere} \cdot \text{secondo} \quad \boxed{1C = 1A \cdot 1s}$$

L'unità di misura della **quantità di elettricità** è il **coulomb** ( **C** ) definito come la quantità di elettricità che attraversa in un secondo una qualsiasi sezione di un conduttore percorso dalla corrente di un ampere .

$$\boxed{[q] = [i] \cdot [t] = [T \cdot I]}$$

- La freccia spesso associata con la corrente in un filo non indica che la corrente **i** è una grandezza vettoriale , ma semplicemente mostra il verso in cui fluisce la carica elettrica. Lungo il filo i **portatori di carica positiva** possono muoversi in una direzione o in quella opposta , e queste due possibilità nelle equazioni algebriche si rappresentano col segno + o col segno - .

Si noti che: **1)** la corrente in un filo non cambia se il filo viene piegato , annodato o distorto e

**2)** le frecce che rappresentano il verso delle correnti non obbediscono alle regole di addizione dei vettori .

- **Interpretazione microscopica della corrente**

Consideriamo un filo conduttore di sezione costante **S** attraversato dalla corrente costante **i** . Sia  $v_d$  la velocità di spostamento ( di **deriva** ) degli elettroni liberi ; essendo in regime stazionario essa può ritenersi costante . Gli elettroni , che all'istante  $t_1$  attraversano la sezione **S** , all'istante  $t_2 > t_1$  hanno percorso uno spazio  $s = v_d(t_2 - t_1) = v_d \Delta t = v t$  . Possiamo dire che nel cilindro retto di base **S** ed altezza  $s = v t$  sono contenuti tutti gli elettroni ( **N** ) di conduzione che nel tempo **t** hanno attraversato la sezione **S** . La carica totale che attraversa la sezione **S** nel tempo **t** è :  $q = N e$  .

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

$$i = \frac{q}{t} = \frac{Ne}{t} = Ne \frac{v_d}{s} \quad \text{ponendo : } n = \frac{N}{V} = \text{numero di elettroni per unità di volume abbiamo :}$$

$$N = nV = n \cdot S \cdot s \quad , \quad i = \frac{Nev_d}{s} = \frac{nSsev_d}{s} \quad , \quad i = nS ev_d \quad , \quad v_d = \frac{i}{nSe} = \frac{J}{ne} \quad , \quad \boxed{J = \frac{i}{S} = nev_d}$$

- Un filo di rame il cui diametro è  $0,06 \text{ cm} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  è percorso da una corrente continua di  $1 \text{ A}$   
**Calcolare la densità di corrente  $J$  e la velocità di deriva  $v_d$  degli elettroni di conduzione.**

L'area della sezione normale  $S$  del filo è :  $S = \pi r^2 = 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-8} = 2,826 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$

$$J = \frac{i}{S} = \frac{1}{2,826 \cdot 10^{-7}} \frac{\text{A}}{\text{m}^2} = 3538,570 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} = 353,8570 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Per calcolare  $n$  partiamo dal fatto che nel rame c'è un elettrone libero per atomo .

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N\rho}{m} \quad \text{con } \rho = \frac{m}{V} = \text{massa volumica ( o densità assoluta )}$$

ma  $N_A = \frac{NA}{m} = \text{numero di Avogadro}$  ,  $A = \text{massa atomica dell'elemento considerato}$

$n = \frac{\rho N_A}{A} = \text{numero di atomi per unità di volume} = \text{numero di elettroni liberi per unità di volume}$

$$\rho = 9 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad , \quad N_A = 6,02295 \cdot 10^{26} \frac{\text{numero di atomi}}{\text{chilomolecola}} \quad , \quad A = 64 \frac{\text{kg}}{\text{K mole}}$$

$$n = 8,4 \cdot 10^{22} \frac{\text{elettroni}}{\text{cm}^3} \quad , \quad v_d = \frac{J}{en} = \frac{353,9}{(8,4)(10^{22})(1,6 \cdot 10^{-19})} = 2,64 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$v_d = \frac{s}{t}$  ,  $t = \frac{s}{v_d}$  ,  $s = 1 \text{ cm} \Rightarrow t \cong 38 \text{ s}$  Gli elettroni di conduzione presenti nel filo di rame

impiegano 38 secondi per muoversi di **1 cm** .

Si tratta di una velocità assai piccola . L'esempio trattato esprime la velocità con cui si muovono gli elettroni liberi nei fili che collegano una lampadina da  $200 \text{ watt}$  ad una presa di  $220 \text{ volt}$  .

La velocità degli elettroni non deve essere confusa con la velocità alla quale viaggiano lungo il filo le variazioni nella configurazione del campo elettrico , velocità che si avvicina alla velocità della luce . Con la stessa velocità si propaga la corrente elettrica : si potrà , in molti casi , assumere che il passaggio della corrente abbia inizio simultaneamente e le sue variazioni di intensità avvengono nello stesso istante attraverso tutte le sezioni del conduttore .

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

### Circuito elettrico elementare

Perché in un conduttore si abbia passaggio di corrente continua, esso deve essere inserito in un *circuito elettrico* che è un dispositivo costituito da :

1°) un generatore di tensione continua che è un dispositivo che mantiene fra due suoi punti ( detti **poli** o **morsetti** ) una d.d.p. ( o tensione ) costante, anche quando nel circuito passa corrente .

2°) da un utilizzatore che può essere un filo metallico , una stufa , una lampadina,...

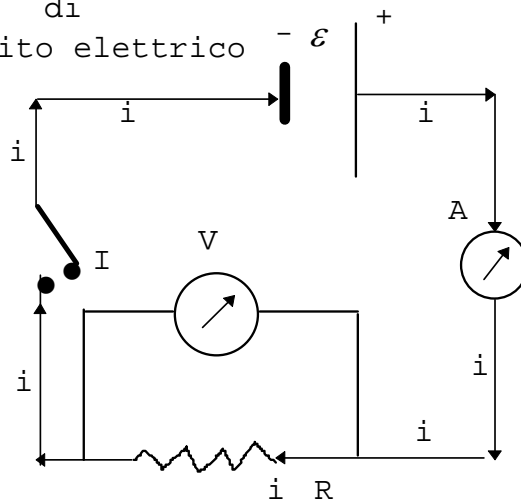
3°) da un interruttore I per aprire o chiudere il circuito

4°) da un amperometro ( da inserire in serie ) per misurare l'intensità  $i$  della corrente

5°) da un voltmetro ( da inserire in parallelo ) per misurare d.d.p.

6°) da eventuali altre parti

Schema elementare  
di  
circuito elettrico



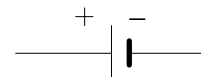
Circuito elettrico costituito da una pila un conduttore di resistenza  $R$ , un interruttore  $I$ , un voltmetro  $V$  inserito in parallelo , un amperometro inserito serie .

Si suppone che i fili di collegamento indicati con segmenti rettilinei abbiano resistenza trascurabile .

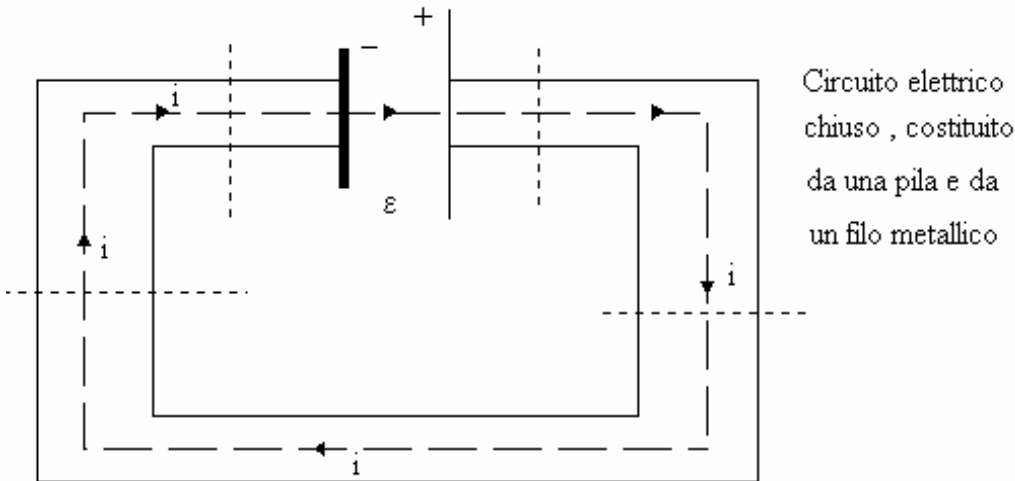
La corrente continua è caratterizzata dal fatto che la sua intensità  $i$  ha lo stesso valore in tutte le sezioni del circuito .

• Quando gli estremi di un filo metallico sono connessi a due punti mantenuti a due potenziali differenti ma fissi , come sono quelli dei terminali di una pila o di una dinamo , il filo viene percorso da corrente , ma il potenziale di ciascun punto del filo rimane costante nel tempo . Il filo conduttore ed il generatore ai cui terminali esso è connesso formano un **circuito completo** detto

anche **circuito chiuso** . Una pila viene rappresentata col simbolo



Il segno << + >> indica il terminale che normalmente si trova a potenziale più elevato .



La figura rappresenta un circuito chiuso e la linea tratteggiata e marcata con una freccia indica il verso convenzionale della corrente  $i$ .

Gli elettroni di conduzione circolano in verso opposto a quello delle frecce; nella pila gli ioni positivi si muovono nel verso convenzionale della corrente e gli ioni negativi nel verso opposto.

- Nella figura sono indicate, mediante linee tratteggiate, alcune sezioni trasversali del circuito.

L'intensità della corrente è la stessa in tutte le sezioni, compresa quella che attraversa la pila.

Si noti bene che il **verso convenzionale** della corrente va << dal più al meno >>, ma soltanto nel circuito esterno. nella pila il verso è quello che va dal meno al più.

- Un **generatore di corrente** è un dispositivo che converte reversibilmente in energia elettrica energia di altra natura.

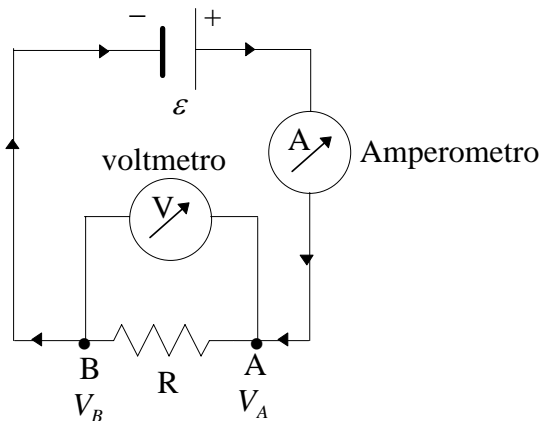
I **generatori elettrostatici** e le **dinamo** convertono in energia elettrica il lavoro meccanico compiuto su di esse da forze di natura non elettrica. Le **pila** convertono l'energia chimica delle reazioni che in esse avvengono.

- Nel **circuito esterno**, l'energia elettrica può essere utilizzata per ottenere nuovamente **energia meccanica** (mediante un motore) o **energia chimica** (come nella carica di una batteria di accumulatori). In tutte queste trasformazioni una certa frazione di energia viene sempre dissipata in modo non recuperabile sotto forma di calore. **Questa energia è fornita a spese dell'energia interna del generatore.**

- Si definisce **forza elettromotrice** (f.e.m.) di un generatore (simbolo usato:  $E$  oppure  $\varepsilon$ ) la **d.d.p.** che esiste fra i suoi estremi (**poli**) quando non eroghi corrente) cioè a **circuito aperto**.



## La prima legge di Ohm



Affinché gli elettroni di conduzione si muovano entro un conduttore dando luogo al passaggio di corrente, è necessario che entro il conduttore vi sia un campo elettrico  $\vec{E}$  non nullo. Ciò equivale ad affermare che affinché un conduttore sia percorso da una corrente d'intensità  $i$  è necessario mantenere tra due punti del conduttore una **d.d.p.**  $V_A - V_B$ .

Per fissare le idee consideriamo un filo metallico :  
 << **l'intensità di corrente che passa nel filo è**

**funzione della d.d.p. applicata agli estremi del filo stesso** >>

La **prima legge di Ohm** fissa la dipendenza di queste due grandezze stabilendo che in un conduttore metallico esse sono direttamente proporzionali, cioè :

$$\frac{V_A - V_B}{i} = R$$

$$V_A - V_B = Ri$$

<< **In un reoforo AB che non sia sede di f.e.m. l'intensità della corrente che l'attraversa è direttamente proporzionale alla d.d.p. applicata ai suoi estremi** >>

La costante di proporzionalità **R** prende il nome di *resistenza elettrica* del conduttore e dipende esclusivamente dalla natura del materiale con cui è fatto il reoforo, dalle sue dimensioni geometriche, dalla sua temperatura, dalla pressione a cui è sottoposto.

$$[R] = \frac{[V]}{[i]} = [L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}] \cdot [I^{-1}] = [L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}]$$

$$\{R\} = \text{ohm} = \Omega = \frac{\{V\}}{\{i\}} = \frac{\text{volt}}{\text{ampere}}$$

Nel S.I. l'unità di misura della resistenza elettrica è l' **ohm** (  $\Omega$  ) che è la resistenza di un conduttore che è percorso dalla corrente di un ampere quando ai suoi estremi applichiamo una d.d.p. di un volt.

<< l' **ohm** è la resistenza di un conduttore che, soggetto alla **d.d.p.** di 1 volt, è attraversato dalla corrente di 1 ampere >>

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

L' inverso  $\frac{1}{R}$  della resistenza dicesi **conduttanza** e viene indicata col simbolo **G** :  $G = \frac{1}{R}$

$$[G] = \frac{[i]}{[V]} = [L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^3 \cdot I^2] \quad \{G\} = \text{siemens} = S = \Omega^{-1}$$

<< **Il siemens è la conduttanza elettrica di un conduttore la cui resistenza elettrica è di 1 ohm** >>

### Seconda legge di Ohm

La seconda legge di Ohm ci dice come varia la resistenza di un conduttore al variare della sua lunghezza  $\ell$  e della sua sezione **S**, cioè :

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$$

**La resistenza R di un conduttore è direttamente proporzionale alla sua lunghezza  $\ell$ , ed inversamente proporzionale alla sua sezione S.**

$\rho$  = *resistenza specifica* o resistività elettrica del materiale

$\{\rho\} = \Omega \cdot m$ , tuttavia spesso si danno i valori di  $\rho$  in  $\Omega \cdot cm$ , cioè in una unità non coerente.

L'inverso  $\frac{1}{\rho}$  della resistenza specifica dicesi **conduttanza specifica** o conduttività del materiale e viene indicata col simbolo  $\sigma$ .

$\rho$  ( e quindi anche **R** ) è una funzione della temperatura  $\vartheta$  del conduttore

$$\rho_{\vartheta} = \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) \quad R_{\vartheta} = R_0 (1 + \alpha \vartheta) \quad \alpha \cong \frac{1}{273,15}$$

$\rho_0$  (  $R_0$  ) è la resistenza specifica ( *resistenza* ) a zero gradi Celsius.

$\rho$  è costante per uno stesso materiale ma varia da materiale a materiale.

$$G = \frac{1}{R} = \sigma \cdot \frac{\ell}{S}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

I conduttori metallici obbediscono alle due leggi di Ohm.

### Il primo principio di Kirchhoff

Si definisce **nodo** ( o punto di diramazione ) un punto di un circuito elettrico comune a tre o più conduttori . Per **maglia** intendiamo un qualsiasi percorso chiuso di un circuito elettrico che gode della seguente proprietà : << partendo da un punto qualsiasi di questo percorso e percorrendo i suoi rami una sola volta si ritorna nello stesso punto . >> Quindi per definire una **maglia** si pensi di

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

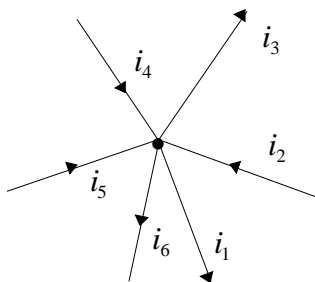
partire da un nodo e di muoversi lungo i conduttori del circuito in modo da ritornare al punto di partenza senza percorrere mai più di una volta ogni conduttore . Ogni percorso di questo genere prende il nome di **maglia** .

### 1) primo principio di Kirchhoff o legge dei nodi o legge delle correnti

<< **La somma algebrica delle correnti che confluiscono in un nodo è nulla** >> , cioè la somma delle correnti che entrano in un nodo è uguale alla somma delle correnti che escono dal nodo.

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Questa legge è una immediata conseguenza della **legge di conservazione della carica elettrica** .



Nel caso della figura abbiamo :

$$i_2 + i_4 + i_5 - i_1 - i_3 - i_6 = 0$$

ed anche :

$$i_2 + i_4 + i_5 = i_1 + i_3 + i_6$$

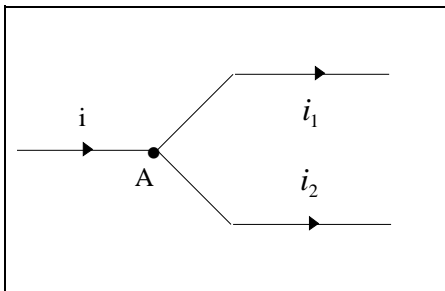


Illustrazione del primo principio di Kirchhoff ( o legge dei nodi o legge delle correnti ) . Poiché non si può creare né accumulare carica elettrica nel punto A , la corrente **i** che entra nel punto A deve essere uguale alla somma  $i_1 + i_2$  delle correnti che ne escono

### Resistenze in serie

- La maggior parte dei circuiti elettrici non è formata semplicemente da una sorgente di **f.e.m.** con in serie un singolo resistore . , bensì comprendono una serie di generatori , resistori , motori , ... collegati in modo più o meno complesso . E' sempre possibile trovare un singolo resistore che sostituisca una certa combinazione di resistori in un circuito e lasci inalterata la **d.d.p.** ai capi della combinazione e la corrente nel resto del circuito .

La resistenza di tale resistore è detta **resistenza equivalente** della combinazione .

- Due o più resistenze si dicono **collegate in serie** quando sono attraversate dalla stessa corrente , cioè quando sono inserite in un circuito una di seguito all'altra .

La resistenza **R equivalente** ad un collegamento in serie è quella che , sostituita a tali resistenze , tra i terminali A e B , lascia invariata la corrente  $i$  . Si tratta di un **conduttore di resistenza R** attraversato dalla corrente  $i$  quando ai suoi estremi è applicata la **d.d.p.**  $V_A - V_B$  .

$$V_A - V_C = R_1 i$$

$$V_C - V_D = R_2 i$$

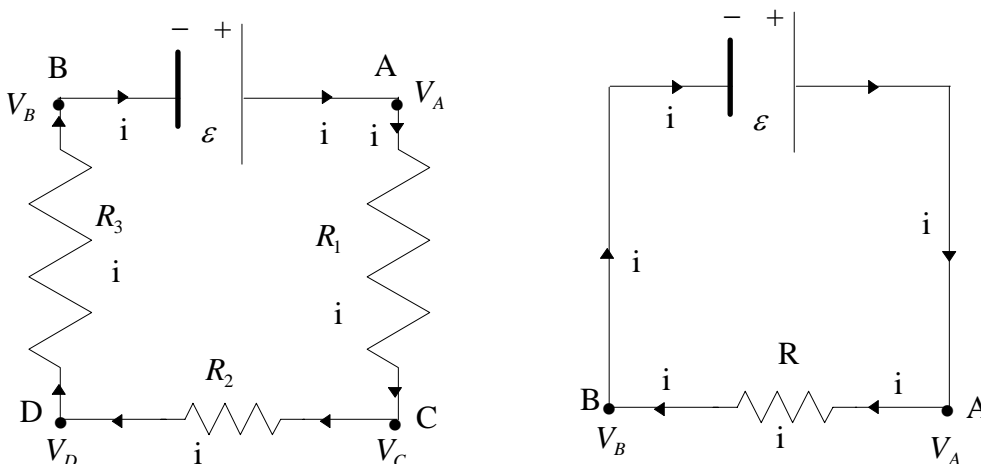
$$V_D - V_B = R_3 i$$

$$V_A - V_B = Ri$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$V_A - V_B = (R_1 + R_2 + R_3)i = Ri$$

<< In una successione di conduttori collegati in serie l'intensità della corrente è uguale in tutti i punti e la **resistenza totale** , detta **resistenza equivalente** , è uguale alla somma delle resistenze dei singoli tratti >> .



## 2) Secondo principio di Kirchhoff o teorema delle maglie o legge delle differenze di potenziale

In una maglia di conduttori la somma algebrica delle **f.e.m.** attive lungo i successivi rami è uguale alla somma algebrica dei prodotti delle intensità di corrente per le rispettive resistenze dei singoli rami della maglia , cioè **in una maglia elettrica la somma algebrica delle f.e.m. uguaglia la somma algebrica delle cadute di potenziale prodotte dalle correnti che circolano nei rami della maglia** .

Dette  $R_k$  ,  $i_k$  ,  $\varepsilon_k$  la **resistenza** , l'**intensità di corrente** , la **f.e.m.** del ramo k-esimo , si ha :

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k = \sum_{k=1}^n i_k R_k \quad [1]$$

cioè , la somma algebrica delle **f.e.m.** e delle **d.d.p.** lungo un attraversamento completo della maglia

è sempre zero :

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k + \sum_{k=1}^n i_k R_k = 0 \quad [2]$$

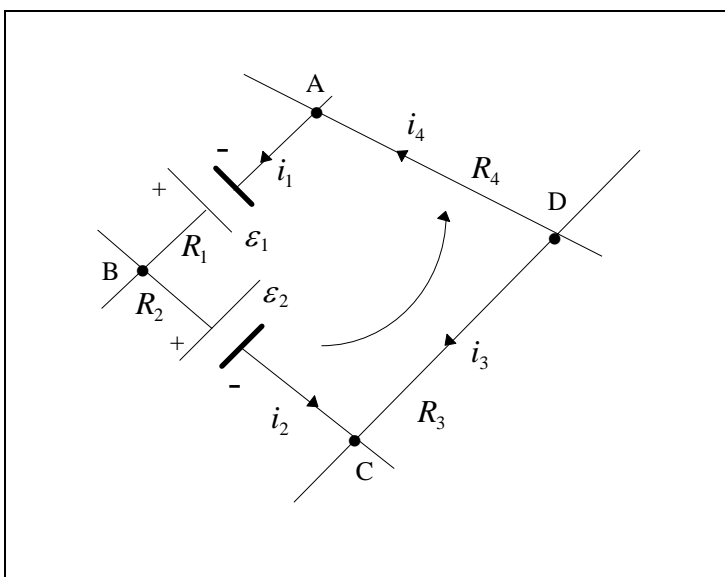
## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

Il secondo principio di Kirchhoff scaturisce dalla semplice considerazione che in regime stazionario la *d.d.p.* tra due punti qualsiasi del circuito è **costante** . Quando ci si sposta lungo un circuito chiuso come la maglia il potenziale può diminuire o aumentare , se si passa attraverso un resistore o una pila , ma quando si è percorsa completamente la maglia e si è tornati al punto di partenza , la **variazione totale** deve essere nulla . Questa legge può essere posta in relazione con la **conservazione dell'energia** anzi può essere considerata come una conseguenza del **principio di conservazione dell'energia** . Infatti , se abbiamo una carica  $q$  in un certo punto in cui il potenziale è  $V$  , la sua energia potenziale è  $qV$  . Quando la carica attraversa la maglia nel circuito , essa perde o acquista energia passando attraverso resistori e pile , ma quando torna al suo punto di partenza la sua energia deve essere di nuovo  $qV$  . Se le resistenze interne delle diverse pile presenti nella maglia non sono trascurabili allora la seconda legge di Kirchhoff va scritta nella seguente maniera :

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k = \sum_{k=1}^N i_k R_k + \sum_{s=1}^n i_s r_s$$

Entrambe queste sommatorie vanno intese come somme algebriche nel senso che , fissato un verso positivo di percorrenza della maglia , ( per esempio quello antiorario ) vanno considerate come **positive** le correnti che circolano in quel verso e come **negative** le correnti che circolano in verso opposto. Per le *f.e.m.* vale la convenzione di prenderle **positive** se tendono a fare circolare la corrente nel verso positivo che è quello che va dal polo negativo della pila al polo positivo della pila

- Se , dopo avere risolto il problema , una corrente risulterà espressa da un numero negativo , ciò starà a significare che essa circola in senso inverso a quello prescelto ed indicato dalla freccia sul circuito . Quindi , se il verso prescelto per la corrente che circola nel ramo considerato è quello reale otterremo un valore positivo . Se , al contrario , otterremo un valore negativo allora il significato di questo risultato è che la corrente circolerà in senso inverso a quello indicato dalla freccia .



Applico la seconda legge di Kirchhoff alla maglia della figura . Otteniamo :

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = R_1 i_1 + R_2 i_2 - R_3 i_3 + R_4 i_4$$

### Resistenze in parallelo o in derivazione

Due o più resistenze si dicono collegate in **parallelo** ( o in derivazione ) quando ai loro estremi è applicata la stessa **d.d.p.** , cioè quando sono inserite tra due medesimi punti di un circuito .

In figura sono mostrate tre resistenze collegate ai morsetti di uno stesso generatore di corrente .

**Qual è la resistenza R equivalente a questo collegamento in parallelo?** La RESISTENZA EQUIVALENTE è quella resistenza **R** che collegata ai morsetti A e B in sostituzione delle tre resistenze in parallelo si lascia attraversare dalla corrente  $i$  . Diversamente possiamo dire che un **solo conduttore di resistenza R è equivalente alle tre resistenze collegate in parallelo se , sotto la stessa d.d.p.  $V_A - V_B$  , convoglia anch'esso l'intensità totale di corrente  $i$  .**

Risulta :  $\boxed{\frac{V_A - V_B}{R} = i}$  Applicando il primo principio di Kirchhoff al nodo A o al nodo B ,

possiamo scrivere : [1]  $\boxed{i = i_1 + i_2 + i_3}$   $\boxed{V_A - V_B = i_1 R_1 = i_2 R_2 = i_3 R_3 = iR}$  [2]

Per la prima legge di Ohm possiamo scrivere :  $i_1 = \frac{V_A - V_B}{R_1}$  ,  $i_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2}$  ,  $i_3 = \frac{V_A - V_B}{R_3}$

Sostituendo nella [1] e semplificando otteniamo :  $\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$

**<< in più conduttori collegati in parallelo , la somma delle intensità delle correnti nei diversi rami è uguale alla intensità della corrente nel ramo principale ; e la conduttanza totale è uguale alla somma delle conduttanze dei singoli rami >>**

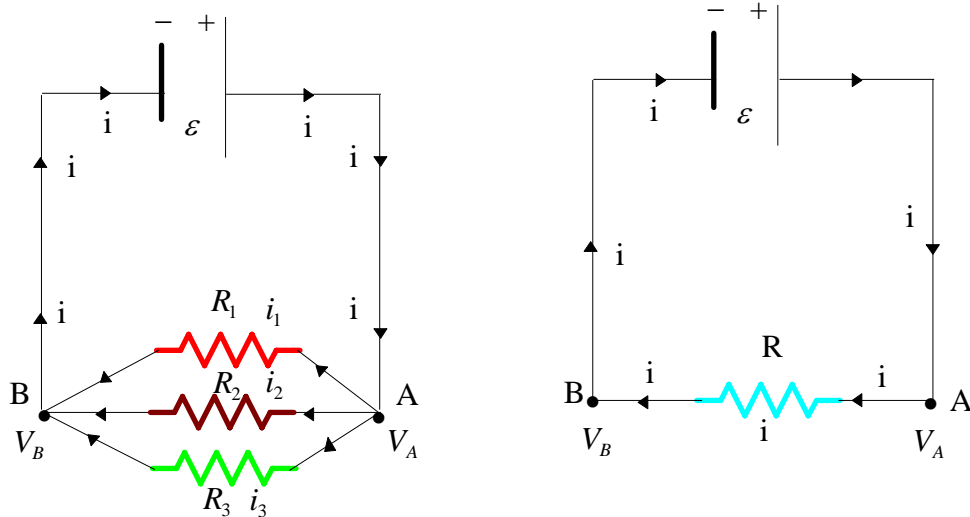
*<< La resistenza equivalente **R** di un collegamento in parallelo è minore di ognuna delle resistenze che lo compongono >> .*

Supponiamo che le tre resistenze collegate in parallelo siano uguali fra loro , cioè supponiamo che :

$$R_3 = R_2 = R_1 \quad , \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} = \frac{3}{R_1} \quad , \quad R = \frac{R_1}{3} \quad \text{cioè : } R < R_1$$

Questo è vero anche quando le singole resistenze non sono uguali fra loro . Dalla relazione [2] deduciamo le seguenti uguaglianze :

$$\boxed{i_1 = \frac{R}{R_1} \cdot i \quad , \quad i_2 = \frac{R}{R_2} \cdot i \quad , \quad i_3 = \frac{R}{R_3} \cdot i \quad , \quad i_1 R_1 = Ri \quad , \quad i_2 R_2 = Ri \quad , \quad i_3 R_3 = Ri}$$



### Shunt

Se i reofori tra A e B sono due otteniamo :  $i = i_1 + i_2$  ,  $V_A - V_B = i_1 R_1 = i_2 R_2$  ,  $i_1 : i_2 = R_2 : R_1$

E quindi , applicando la proprietà del componendo , otteniamo :

$$(i_1 + i_2) : i_2 = (R_1 + R_2) : R_1 \quad , \quad i : i_2 = (R_1 + R_2) : R_1$$

$$i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i = \frac{i}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

La corrente  $i$  si divide nel nodo A in due parti inversamente proporzionali alle resistenze  $R_1$  ed  $R_2$  .

Od anche : nel ramo (2) passa la frazione  $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$  della corrente totale  $i$  .

Se  $R_1$  è molto minore di  $R_2$  (  $R_1 \ll R_2$  ) ,  $i_2$  è una piccola parte di  $i$  . Il ramo (1) rappresenta uno **shunt** ( o derivatore o *deviatore* di corrente ) .

$$R_2 = 9R_1 \quad \Rightarrow \quad i = 10i_2 \quad \left( i_2 = \frac{i}{10} \right)$$

$$R_2 = 99R_1 \quad \Rightarrow \quad i = 100i_2 \quad \left( i_2 = \frac{i}{100} \right)$$

$$R_2 = 999R_1 \quad \Rightarrow \quad i = 1000i_2 \quad \left( i_2 = \frac{i}{1000} \right)$$

L'uso più comune dello **shunt** si ha negli **amperometri** ( anche di maggiore precisione ) per corrente continua .

Questi sono , per esempio , dei milliamperometri , cioè sulla scala indicano direttamente in  $10^{-3}$  A l'intensità della corrente che li attraversa .

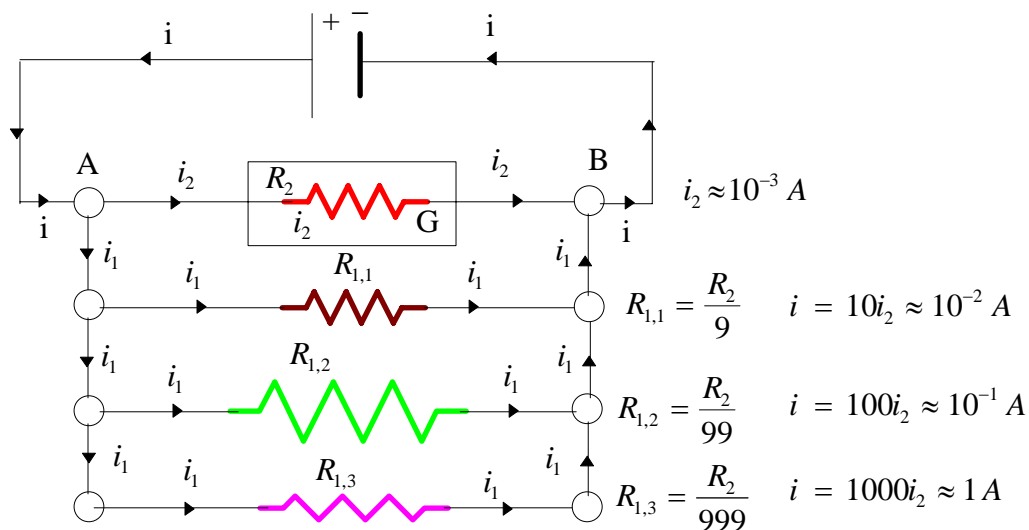
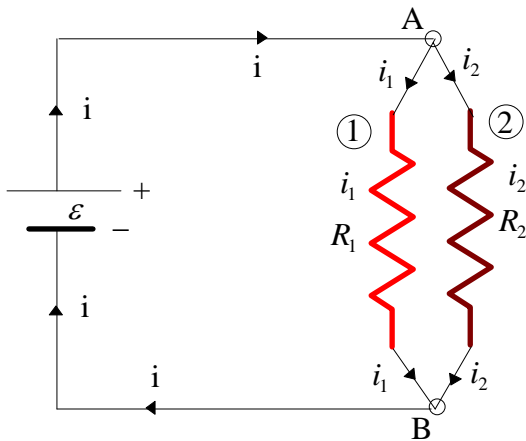
## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

Ciascuno di tali milliamperometri è fornito di un << **corredo di shunt** >> da inserire tra i serrafili A e B del milliamperometro , come è indicato in figura . Si dice che l'amperometro **G** è **shuntato** .  
 Se  $R_2$  è la resistenza interna del milliamperometro , le resistenze dei vari shunt sono , ad esempio :

$$R_{1,1} = \frac{R_2}{9} \quad , \quad R_{1,2} = \frac{R_2}{99} \quad , \quad R_{1,3} = \frac{R_2}{999}$$

Così il milliamperometro shuntato col primo shunt misura la corrente  $i$  in  $10^{-2} A$  , col secondo shunt misura  $i$  in  $10^{-1} A$  , col terzo shunt misura  $i$  in ampere .

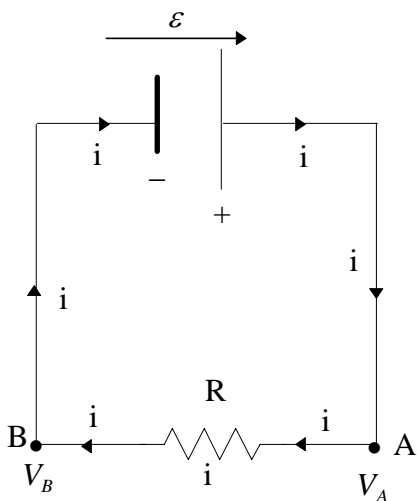
Come ogni galvanometro , il milliamperometro è ancora inserito in serie col circuito dato dove deve misurare la corrente  $i$  , ma solo una frazione nota di questa serve a farlo funzionare .





## Forza elettromotrice

Esistono alcuni apparecchi , come batterie e generatori elettrici , capaci di mantenere una d.d.p. fra due punti ai quali sono collegati . Si dice che tali apparecchi sono **sorgenti di forza elettromotrice** . Una forza elettromotrice ( **f.e.m.** ) è rappresentata con una freccia posta vicino alla sorgente e diretta nel verso in cui la sorgente farebbe muovere , nel circuito esterno , un portatore di carica positiva .



Una sorgente di **f.e.m.** deve eseguire un lavoro sui portatori di carica che entrano in essa . Ad esempio nel circuito della figura , la sorgente sposta le cariche positive da un punto a basso potenziale ( il **morsetto negativo** ) ad un punto ad alto potenziale ( il **morsetto positivo** ) attraverso la sorgente stessa .

Nella figura , nel tempo  $t$  , una carica  $q$  passa attraverso ogni sezione trasversale del circuito , in particolare entra nella sorgente di **f.e.m.**  $\varepsilon$  all'estremo a basso potenziale e ne esce all'estremo ad alto potenziale .

La sorgente deve eseguire un lavoro  $L$  per costringere i portatori di carica ( positiva ) a portarsi al punto il cui potenziale è più elevato .

La **f.e.m.** della sorgente è definita dalla seguente relazione :

$$\varepsilon = \frac{L}{q}$$

Una carica elettrica positiva mobile si sposta nel verso della corrente dal potenziale più elevato verso il potenziale più basso : **il ruolo della f.e.m. è quello di fare ritornare tale carica dal potenziale più basso a quello più alto** , fornendo al sistema l'energia necessaria per determinare il passaggio di corrente , quell'energia dissipata per la legge di Joule .

Il fatto che una sorgente di **f.e.m.** esegua un lavoro sui portatori di carica , implica che , all'interno della sorgente , si abbia una trasformazione dell'energia ; per esempio in una batteria l'energia chimica si è trasformata un energia elettrica .

Così possiamo descrivere una sorgente di **f.e.m.** come un apparecchio nel quale energia chimica , meccanica o di altra natura viene trasformata ( reversibilmente ) in energia elettrica .

L' **energia chimica** data dalla batteria è immagazzinata nei **campi elettrico e magnetico** che circondano il circuito .

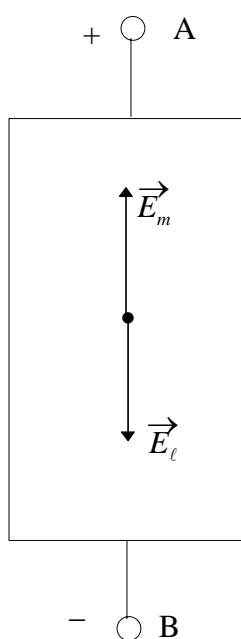
- Il concetto di **f.e.m.** è uno dei più delicati e quindi è opportuno chiarirlo ulteriormente .

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

1) Abbiamo detto in elettrostatica che tutti i punti di un conduttore in equilibrio debbono essere allo stesso potenziale . **Una batteria isolata è un conduttore in equilibrio, eppure tra i suoi poli esiste una d.d.p. detta f.e.m. ?** Come la mettiamo con questa apparente contraddizione ?

Il principio di equipotenzialità di tutti i punti di un conduttore vale soltanto per i conduttori chimicamente e fisicamente omogenei .

Nessuna batteria soddisfa a queste condizioni : una batteria d'auto , per esempio , contiene piombo , acqua , acido solforico . Nell'interno della batteria esiste un **campo elettromotore**  $\vec{E}_m$  . Esso agisce su una carica elettrica  $q$  con una forma  $\vec{F}_m = q \cdot \vec{E}_m$  e quindi ha diritto di chiamarsi << **elettro...** >> ma non **elettrostatico** . Infatti esso non ha origine da distribuzioni statiche di cariche elettriche . La sua origine dipende dal tipo di batteria .



Solitamente  $\vec{E}_m$  è di origine chimica , ma potrebbe anche esser di origine meccanica . Allora  $\vec{E}_m$  sposterà gli elettroni di conduzione verso un polo , detto appunto **negativo** , ed il polo opposto rimane carico positivamente . Le cariche ai poli generano un **campo elettrostatico**  $\vec{E}_e$  con verso opposto ad  $\vec{E}_m$  .

Quando  $\boxed{\vec{E}_e = -\vec{E}_m}$  si raggiunge la **condizione di equilibrio** poiché sugli elettroni agiscono forze a risultante nullo e quindi non si ha ulteriore spostamento . La **d.d.p.** dovuta all'accumulo di cariche ai poli è la **f.e.m.** , cioè la **f.e.m. di un generatore è il rapporto tra il lavoro ( massimo ) L che le forze del campo elettromotore ( di origine non elettrostatica ) compiono per trasportare una carica positiva q sull'elettrodo a potenziale minore a**

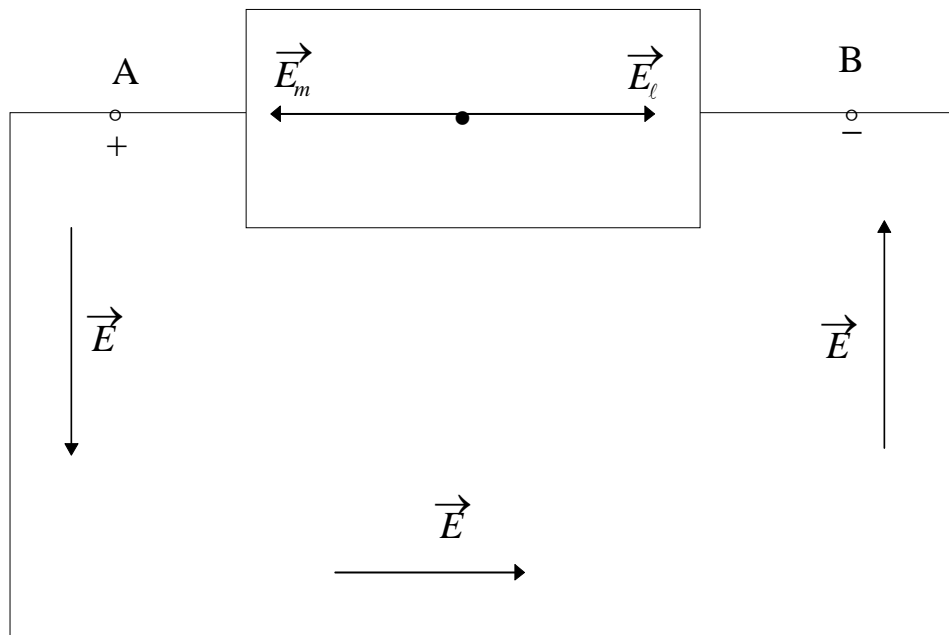
**quello a potenziale maggiore , e la carica q stessa .**

$$\boxed{\varepsilon = \frac{L}{q}}$$

Il campo elettromotore agisce soltanto all'interno del generatore .

**2)** Quando il passaggio di corrente ha convogliato sul polo positivo della batteria una quantità di elettroni tale da annullare la **d.d.p.** tra i poli , la corrente dovrebbe annullarsi . Chi ripristina la d.d.p. originaria ?

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica



Quando colleghiamo i due poli con un conduttore , si rompe la condizione di equilibrio  $\vec{E}_\ell = -\vec{E}_m$

Il campo elettrostatico  $\vec{E}_\ell$  all'interno della batteria ha modulo  $E_\ell < E_m$  ed esiste anche un campo elettrostatico  $\vec{E}$  lungo il conduttore . Gli elettroni di conduzione possono muoversi da A verso B all'interno della batteria ( in quando sottoposti all'azione del campo  $\vec{E}_m - \vec{E}_\ell$  avente modulo non nullo ) e da B verso A nel conduttore per effetto del campo  $\vec{E}$  .

Si è stabilita una corrente elettrica che dura finché la batteria non si scarica , cioè fino a quando la batteria non è più in grado di portare elettroni dal polo A al polo B .

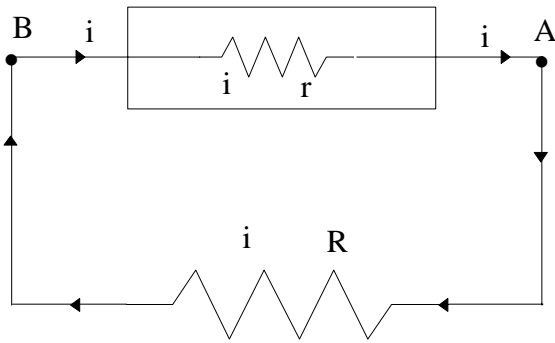
### 3) Il circuito si riscalda per effetto Joule , quindi la pila deve fornire lavoro . Ma qual è il campo che compie lavoro ?

Il circuito è chiuso ed essendo il **campo elettrostatico** conservativo il lavoro compiuto dalle sue forze lungo tutto il circuito è nullo . Pertanto sono le forze del **campo elettromotore**  $\vec{E}_m$  ( che è nullo al di fuori del generatore che non è tenuto ad essere conservativo ) a compiere il lavoro **L** su una carica **q** quando questa percorre l'intero circuito .

Il rapporto tra il lavoro **L** e la carica **q** è la **f.e.m.** del generatore che coincide anche ( essendo  $\vec{E}_m$  nullo al di fuori del generatore ) col rapporto tra il lavoro **L** compiuto dalle forze del **campo elettromotore** per portare la carica positiva dal polo negativo a quello positivo e la carica **q** quando il circuito è aperto ed il generatore in equilibrio .

## La prima legge di Ohm applicata ad un circuito chiuso

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica



Quando in un circuito chiuso passa una corrente  $i$  ( che in condizioni stazionarie è costante ) bisogna tenere conto del fatto che la corrente  $i$  passa non solo entro il conduttore esterno di resistenza  $R$  ma anche entro il generatore il quale presenta sempre una resistenza  $r$  diversa da zero , sicché la **resistenza**

**totale** dell'intero circuito è  $R + r$  e quindi la legge di Ohm va scritta :

$$\boxed{\frac{\varepsilon}{i} = R + r} \quad \text{cioè :} \quad \boxed{\varepsilon = (R + r)i} \quad [\text{A}]$$

La relazione [A] può essere scritta così :  $\varepsilon = RI + ri$

Ma :  $RI = V_A - V_B$  e quindi :  $\boxed{\varepsilon = V_A - V_B + ri}$  [B]  $\boxed{V_A - V_B = \varepsilon - ri}$  [C]

Questa relazione mostra che la **d.d.p.** tra i morsetti del generatore a circuito aperto è maggiore di quella che si stabilisce tra gli stessi punti a circuito chiuso .

La [B] mostra pure che la **resistenza interna**  $r$  di un generatore è valutabile mediante misure di **d.d.p.** e di intensità di corrente .

Se  $r \ll R$  non si commette un errore apprezzabile nello scrivere la [B] nella forma :

$$\varepsilon = Ri = V_A - V_B$$

In altri termini , quando la resistenza interna è molto piccola rispetto al **carico esterno** , la **f.e.m.** si confonde con la **d.d.p.** ai morsetti del generatore a circuito chiuso .

### Forza elettromotrice e differenza di potenziale

Consideriamo un qualsiasi circuito percorso dalla corrente  $i$  e siano **A** e **B** due suoi qualsiasi punti . La *d.d.p.* fra questi due punti può avere un solo valore . Questo significa che dobbiamo ottenere lo stesso risultato per tutti i percorsi che collegano questi due punti . Consideriamo il percorso  $B \varepsilon A$  .

Abbiamo :  $V_B + \varepsilon - ir = V_A \Rightarrow \boxed{V_A - V_B = \varepsilon - ir}$  **Legge di Ohm generalizzata**

Consideriamo il percorso  $BRA$  . Abbiamo :

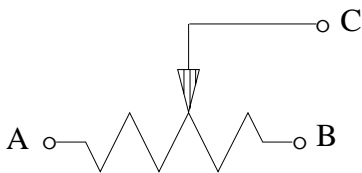
$V_B + Ri = V_A \quad \boxed{V_A - V_B = Ri}$  **Prima legge di Ohm**

$V_A - V_B = V_A - V_B \Rightarrow \varepsilon - ir = Ri \quad \varepsilon = (R + r)i$  già trovata per altra via

### Reostati

Gli **elementi attivi** di un circuito sono il generatore di tensione e il *generatore di corrente* , mentre gli **elementi passivi** di un circuito elettrico sono :

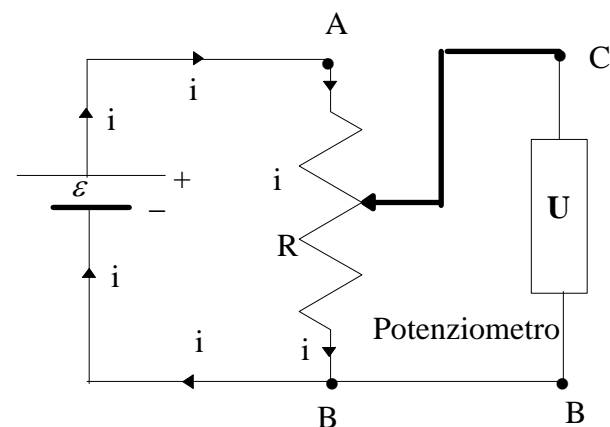
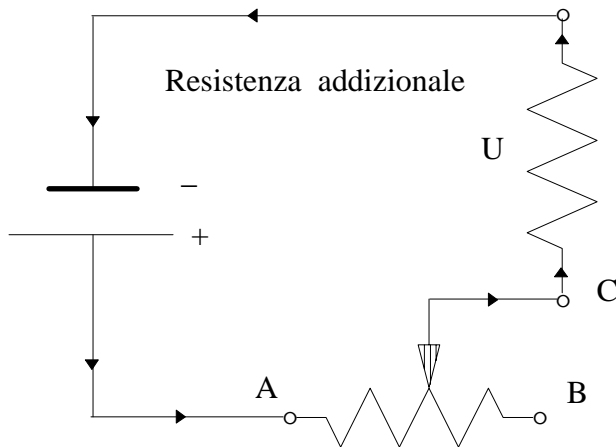
**a) i resistori** chiamati anche resistenze **b) i capacitori** detti anche condensatori **c) gli induttori** chiamati anche induttanze . I **reostati** sono dispositivi che , inseriti in un circuito elettrico , consentono di variarne la resistenza elettrica entro certi limiti . Per la costruzione dei reostati si utilizzano fili conduttori capaci di mantenersi a temperatura costante quando sono attraversati dalla corrente . Di solito questi fili conduttori sono costituiti da opportune leghe metalliche ( come la **costantana**, l'*argentana*, la manganina, il **nichelcromo** ) le quali presentando una **resistenza specifica**  $\rho$  piuttosto elevata risultano poco variabili con la temperatura. Abbiamo reostati a cursore, reostati a cassetta, reostati a tastiera. I **reostati a cursore** sono costituiti da un supporto cilindrico isolante ( ad esempio ceramica ) su cui è avvolto un filo metallico di elevata **resistività** avente gli estremi fissati a due morsetti A e B . Un cursore metallico scorrevole lungo un'asta metallica ( di sezione assai maggiore di quella del filo e di lunghezza uguale a quella del supporto ) stabilisce il contatto tra un terzo morsetto C ( generalmente di colore rosso ) e una qualsiasi spira . Collegato il reostato al circuito in A e C ( oppure in B e C ) , spostando il cursore è possibile variare con continuità la lunghezza del filo inserito e quindi il valore della resistenza , da zero al valore massimo corrispondente alla resistenza di tutto il filo . Tale **valore massimo** è indicato su una targhetta assieme alla corrente massima che il resistore può sopportare . I **reostati a cursore** si rappresentano convenzionalmente come indicato in figura .



I reostati a cursore si utilizzano nei laboratori di fisica o come resistenze aggiuntive per regolare l'intensità di corrente o come *partitori di tensione* ( **potenziometri** ) per prelevare **d.d.p.** variabili .

Se si usa come **resistenza aggiuntiva** il reostato deve essere inserito nel circuito come indicato in figura . In tal caso la corrente entra nel reostato da A ed esce attraverso il cursore C . Spostando C varia la resistenza inserita e quindi varia l'intensità della corrente nell'utilizzatore U .

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica



Se il reostato a cursore viene usato come *partitore di tensione* (cioè come **potenziometro**), deve essere inserito come indicato in figura. Gli estremi A e B sono collegati ai poli del generatore avente **f.e.m.**  $\varepsilon$ . Se **R** è la resistenza di tutto il conduttore che realizza il reostato e  $V_A - V_B$  la **d.d.p.** che si stabilisce ai suoi estremi, la corrente **i** che circola in esso è, per la

legge di Ohm

$$i = \frac{V_A - V_B}{R}$$

Tra i punti C e B del reostato esiste una caduta di tensione (**d.d.p.**) data da :

$$V_C - V_B = R_{CB} \cdot i = \frac{R_{CB}}{R} (V_A - V_B)$$

essendo  $R_{CB}$  la resistenza del conduttore compreso tra C e B. Spostando il cursore C tra A e B si possono ottenere tra i punti A e B **d.d.p.**

variabili dal valore zero quando ( $C \equiv B$ ) al valore massimo  $V_A - V_B$  (quando  $C \equiv A$ ).

Un **reostato a cassetta** è costituito da un certo numero di resistenze di valore noto collegate in serie. Mentre con il reostato a cursore è possibile variare con continuità la resistenza fra un valore minimo ed uno massimo, con un reostato a cassetta è possibile variare la resistenza solo per quantità definite e costanti. Nella cassetta sono contenute delle spiruline di resistenza nota che collegano dei grossi blocchi metallici di resistenza trascurabile. I diversi blocchetti sono separati tra di loro da un piccolo intervallo. Sui blocchetti estremi sono fissati i serratili A e B. Inserendo una o più spine metalliche fra questi blocchi, risultano escluse le resistenze delle spiruline corrispondenti perché la corrente, che è inversamente proporzionale alla resistenza, attraversa in pratica soltanto i blocchi consecutivi posti a contatto delle spine.

Quando nella cassetta non è inserita nessuna spina, la corrente **i** per andare da A a B dovrà attraversare tutte le spiruline ed incontrerà quindi una resistenza uguale alla somma delle loro resistenze. Quando si inserisce la spina D si elimina la resistenza di  $2\Omega$  e quindi la resistenza complessiva è di  $8\Omega$ . Inserendo tra i blocchetti un diverso numero di spine, in modo da escludere dal circuito alcuni reofori, si possono ottenere diversi valori della resistenza. Su ogni cassetta è spesso indicato il **carico** che essa può sopportare, cioè l'intensità della corrente che può venirvi convogliata senza riscaldare eccessivamente i reofori.

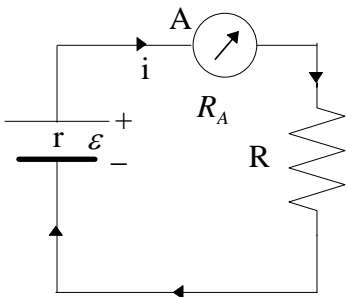
## Strumenti di misura : amperometri , voltmetri , ohmetri

In questo paragrafo studieremo la misurazione delle principali grandezze elettriche che intervengono nei circuiti in corrente continua . I dispositivi che misurano l'intensità di corrente , la differenza di potenziale e la resistenza sono chiamati rispettivamente **amperometri** , voltmetri , *ohmetri* .

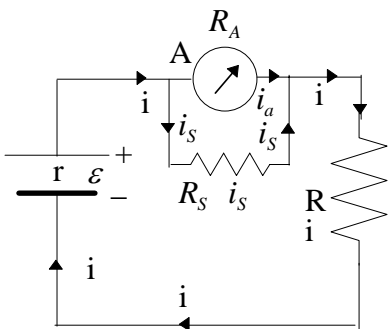
I più comuni strumenti di misura sono ad **indice** con deviazione prodotta dall'effetto magnetico della corrente . A seconda della loro sensibilità questi strumenti vengono chiamati amperometri , milliamperometri , microamperometri , galvanometri . Quest'ultimi sono in grado di misurare correnti elettriche dell'ordine di  $10^{-11}$  A . Per misurare l'intensità della corrente che passa in un ramo di un circuito si usano gli amperometri destinati a misurare correnti anche molto intense ( da qualche ampere fino a decine e centinaia di ampere ) .

L'amperometro viene collegato in serie con il ramo stesso , in modo che tutta la corrente che fluisce nel ramo lo attraversi . Poiché l'amperometro ha una certa resistenza  $R_A$  , l'intensità della corrente nel circuito cambia quando viene inserito l'amperometro . Idealmente l'amperometro dovrebbe avere una resistenza molto piccola rispetto alla resistenza **R** del circuito ( $R_A \ll R$  ) se non vogliamo alterare l'intensità della corrente da misurare con l'inserimento dell'amperometro .

Per misurare la **d.d.p.** esistente tra due punti di un circuito si possono adoperare gli **elettrometri** ; ma essendo strumenti molto sensibili e delicati , si usano assai raramente .



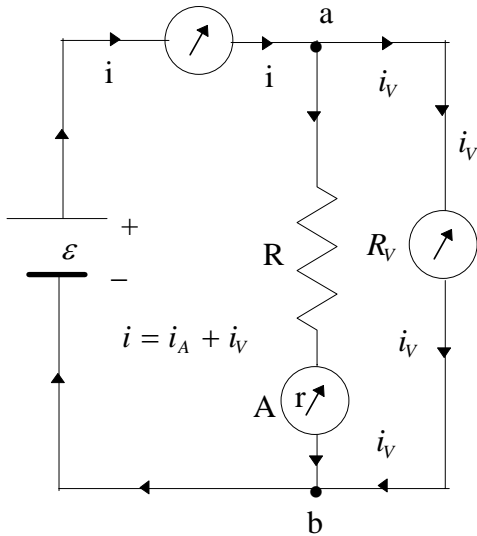
Per misurare la corrente  $i$  nel resistore **R** si inserisce in serie col resistore un amperometro **A** di resistenza  $R_A \ll R$  . Solo così la corrente  $i$  da misurare non varia sensibilmente .



Amperometro con shunt per misurare correnti **i** maggiori di quelle indicate sul fondo scala dell'amperometro .

$$R_A = 9 R_S \Rightarrow i = 100 i_A$$

$$R_A = 99 R_S \Rightarrow$$



Per misurare la **d.d.p.** agli estremi di un resistore **R** si inserisce in parallelo con esso un voltmetro **V** di resistenza  $R_V \gg R$  .

Il voltmetro riduce la resistenza tra i punto **a** e **b** , aumentando così la corrente totale nel circuito e modificando la **d.d.p.** agli estremi della resistenza **R** .

Di solito per misurare la **d.d.p.** esistente tra due punti di un circuito si usa il **voltmetro** che è un amperometro con una elevata resistenza addizionale in serie . Il voltmetro deve essere inserito in **parallelo** , cioè con i morsetti posti nei punti interessati . Applicando la prima legge di Ohm

abbiamo:  $V_A - V_B = (r + R_A)i_A = R_V \cdot i_V$

$$\frac{i_V}{i_A} = \frac{r + R_A}{R_V}$$

Si vede che  $i_V$  è tanto più piccola quanto più grande è la resistenza  $R_V$  del voltmetro rispetto a  $(r + R_A)$  somma della resistenza del circuito e di quella interna dell'amperometro A .

Possiamo concludere affermando che un buon amperometro ( voltmetro ) deve avere **bassa** ( alta ) resistenza  $R_A \ll R$  ( $R_V \gg R$ ) .

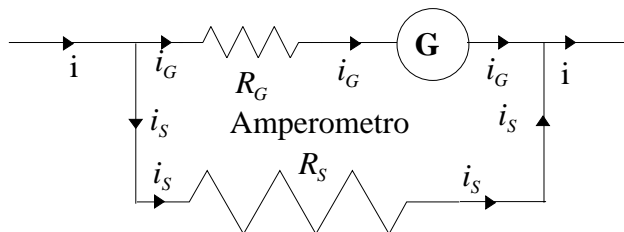
Il principale componente di un amperometro o di un voltmetro è un **galvanometro** , cioè un dispositivo che rivela una piccola corrente che lo attraversa . Il tipo più comune , il **galvanometro di Deprez-D'Arsonval** , è costituito da una bobina di filo libera di ruotare attorno al suo asse , da un indice e da una scala . Il galvanometro è progettato in modo che l'indicazione della scala sia direttamente proporzionale all'intensità della corrente che attraversa lo strumento .

Il funzionamento di un galvanometro si basa sul principio che una bobina percorsa da una corrente in un campo magnetico è soggetta ad una coppia di forze ( **coppia motrice** ) il cui momento è , in modulo , direttamente proporzionale all'intensità della corrente . Questa coppia motrice fa ruotare la bobina finché non è equilibrata dalla coppia di richiamo fornita dalla sospensione meccanica della bobina .

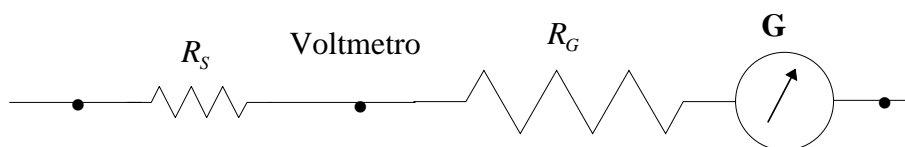


## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

Per costruire un **amperometro** partendo da un galvanometro , si inserisce un piccolo resistore  $R_S$  , chiamato **derivatore** o **shunt** , in parallelo col galvanometro . Poiché la resistenza dello shunt è di solito molto minore della resistenza del galvanometro  $G$  , la maggior parte della corrente attraversa lo shunt e la resistenza equivalente dell'amperometro è molto minore della resistenza del galvanometro .



Un amperometro è costituito da un galvanometro  $G$  e da un piccolo resistore  $R_S$  in parallelo , chiamato derivatore o shunt



Un voltmetro è costituito da un galvanometro  $G$  con un resistore in serie di grande resistenza  $R_S$

La figura rappresenta un **ohmetro** costituito da una pila di **f.e.m.**  $\varepsilon$  , da un galvanometro  $G$  di resistenza interna  $R_G$  e da un resistore avente resistenza  $R_S$  ; esso può essere usato per misurare una resistenza incognita  $R_x$  . La resistenza  $R_S$  è scelta in modo che l'indice del galvanometro devii a fondo scala quando i morsetti A e B sono corto circuitati , cioè sono posti a contatto tra loro .

Perciò il fondo scala sul galvanometro corrisponde alla resistenza **zero** ( $R_x = 0$  ) . Questo significa

che la corrente massima (  $i_m = \frac{\varepsilon}{R_S + R_G}$  ) corrisponda allo zero della graduazione in **ohm** quando

lo strumento è in << **corto circuito** >> ( resistenza esterna  $R_x = 0$  ) .

Quando i morsetti sono collegati ai capi di un resistore di resistenza incognita  $R_G$  , l'intensità  $I$  della corrente è minore di  $i_m$  e l'indice del galvanometro non devia a fondo scala . L'intensità della

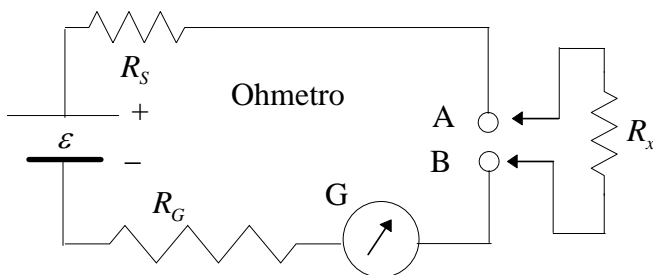
corrente in questo caso è :

$$I = \frac{\varepsilon}{R_S + R_G + R_x}$$

Poiché questa intensità di corrente dipende da  $R_G$  , la scala deve essere tarata in funzione della resistenza misurata , dal valore **zero** in corrispondenza del fondo scala al valore infinito in corrispondenza della deviazione **zero** .

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica

Poiché la taratura della scala è lungi dall'essere lineare e dipende dalla costanza della **f.e.m.** della pila , tale ohmetro non è uno strumento di alta precisione ; ma è abbastanza utile per eseguire misurazioni rapide , seppure grossolane , della resistenza .



Un **ohmetro** è costituito da una pila di **f.e.m.**

$\varepsilon$  in serie con un **galvanometro G** di resistenza  $R_G$  e con un resistore  $R_S$  scelto in modo che il galvanometro dia una deviazione a fondo scala quando i punti A e B sono cortocircuitati .

### Effetti principali della corrente elettrica

• Il moto delle cariche elettriche attraverso un conduttore è dovuto al campo elettrico  $\vec{E}$  che agisce su di esse . Le forze di tale campo compiono un lavoro che , nel caso di un conduttore di resistenza  $\mathbf{R}$  , vale :

$$L = q(V_A - V_B) = i^2 R t$$

Questo lavoro spesso viene restituito sotto forme diverse di energia : in altre parole , la **corrente elettrica produce diversi effetti** .

Gli effetti principali della corrente elettrica sono tre :

- 1) **effetto Joule** o effetto termico
- 2) **effetto chimico**
- 3) **effetto magnetico**

Si ammette come incondizionatamente valido il **principio di conservazione dell'energia elettrica** nell'ambito delle trasformazioni dell'energia elettrica in energia di altra specie .

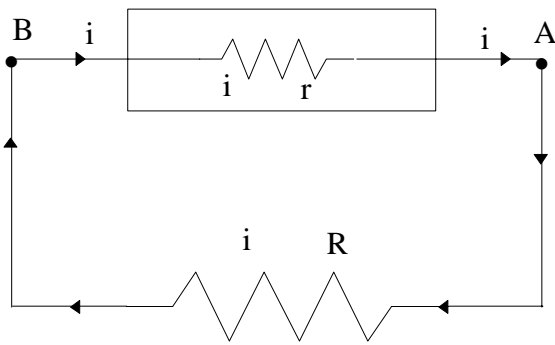
### Energia e potenza di una corrente elettrica continua

Una macchina elettrica , in quanto genera una **d.d.p.** tra i due suoi poli , deve essere pensata come la causa del moto delle cariche elettriche presenti all'interno del conduttore . La **d.d.p.** che la macchina può generare ( a circuito aperto ) ha per questo il nome di **forza elettromotrice** ( **f.e.m.** ) e si indica

con uno dei seguenti simboli :  $\varepsilon$  ,  $e$  ,  $\mathbf{E}$  ,  $\mathbf{f}$  .

Se nel **reoforo** AB di resistenza  $\mathbf{R}$  passa la corrente  $\mathbf{i}$  da A verso B , attraverso una sezione qualunque del reoforo passa nel tempo  $\mathbf{t}$  la quantità di elettricità :  $q = i t$

## Unità Didattica N° 25 : La corrente elettrica



Nel tempo  $t$  una carica  $q$  è entrata nel reoforo in A ( ove il potenziale è  $V_A$  ) ed una uguale carica  $q$  è uscita da B ( ove il potenziale è  $V_B < V_A$  ) .

Alla resa dei conti , è come se una carica  $q$  fosse passata dal punto A ove il potenziale è  $V_A$  al punto B ove il potenziale è  $V_B$  .

Quando la carica  $q$  passa dal punto A al punto B le forze del campo compiono un lavoro dato da :

$$L_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = U_A - U_B = q \cdot (V_A - V_B) = (V_A - V_B) i t$$

Se la carica  $q$  passa attraverso un circuito nel quale vale la **legge di Ohm**  $V_A - V_B = R i$  , la formula precedente diventa :

$$L_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = U_A - U_B = q \cdot (V_A - V_B) = (V_A - V_B) i t = i^2 R t = \frac{(V_A - V_B)^2}{R} \cdot t$$

La **potenza  $W$** <sup>1</sup> sviluppata o assorbita dal circuito esterno vale :

$$W = \frac{L}{t} = (V_A - V_B) i = i^2 R = \frac{(V_A - V_B)^2}{R} \quad [**]$$

La formula [\*\*] è nota come **legge di Joule** e non è altro che un modo particolare di scrivere il **principio di conservazione dell'energia** nel caso in cui l'energia elettrica sia trasformata in energia termica ( calore ) .

E' opportuno , a questo punto , osservare che le relazioni [\*\*] da noi trovate rappresentano la **potenza che si sviluppa** nel solo circuito esterno al generatore .

Per calcolare l' **energia totale che per unità di tempo si sviluppa in tutto il circuito** , basterà fare uso della relazione :  $\varepsilon = (R+r)i$  avendosi questa volta :

$$\varepsilon = \frac{L}{q} \quad L = \varepsilon q \quad W = \frac{L}{t} = \frac{\varepsilon q}{t} = \varepsilon i \quad \boxed{W = \varepsilon i = i^2(R+r) = i^2 R + i^2 r = \frac{\varepsilon^2}{R+r}}$$

In questa formula  $i^2 R$  è la **potenza che si sviluppa nella parte esterna del circuito** , mentre  $i^2 r$  è la **potenza che si sviluppa all'interno del generatore** .

### Effetto Joule e sua interpretazione microscopica

Per semplicità noi abbiamo sempre parlato della corrente elettrica che fluisce in un conduttore come di un flusso di elettroni di conduzione che si muovono tutti con la stessa velocità  $v_d$  ; ma il moto degli elettroni di conduzione può essere più accuratamente descritto come una serie di accelerazioni che terminano ogni volta con una collisione con le particelle fisse ( **ioni del reticolo** ) del conduttore.

Nel cammino fra due collisioni successive gli elettroni acquistano energia cinetica che poi cedono interamente alle particelle fisse urtando contro di esse .

L'energia acquistata in tal modo dalle particelle fisse ( che **sono fisse nel senso che la loro posizione media non cambia** ) aumenta l'ampiezza delle loro oscillazioni . In altri termini essa è convertita in **energia termica** ( cioè in calore ) .

L'**effetto Joule** consiste , pertanto , nella trasformazione dell'energia elettrica in energia termica ( il conduttore si riscalda ) cosa questa che fa aumentare l'energia cinetica degli ioni del reticolo aumentando la temperatura del conduttore .

Vediamo adesso come è possibile verificare sperimentalmente l' **effetto Joule** . Vogliamo misurare il calore **q** prodotto da una corrente **i** che fluisce in un conduttore ohmico di resistenza **R** .

Esamineremo qui il caso in cui la perdita di energia elettrica si ritrova tutta sotto forma di calore , come accade quando si pone in un **calorimetro isoterma** ( ossia a temperatura costante come avviene nel **calorimetro di Bunsen** ) un conduttore di resistenza **R** in cui fluisce una corrente di intensità **i** .

---

<sup>1</sup> La **potenza** è l'energia assorbita o sviluppata nell'unità di tempo o meglio è l'energia riferita al tempo