

FISICA

ElettroMagnetismo

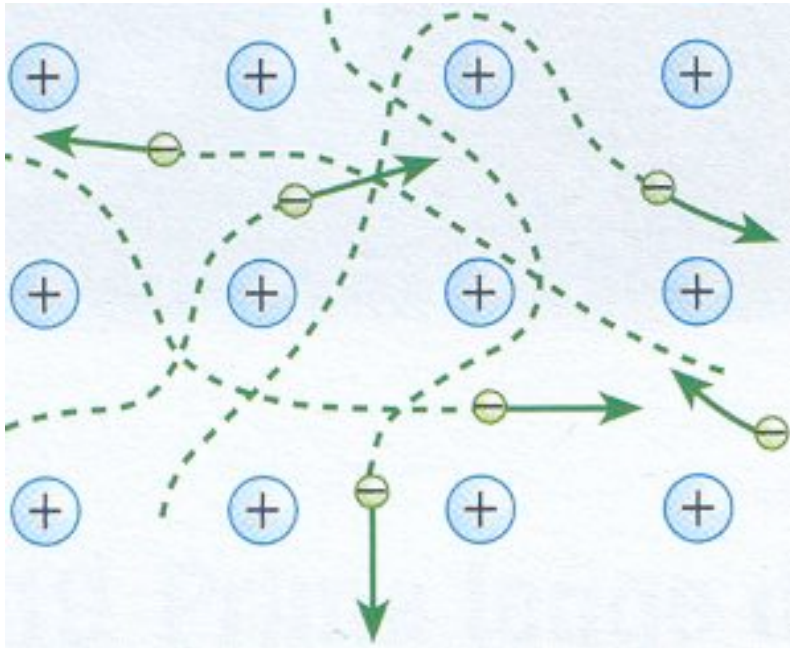
LA CORRENTE
ELETTRICA

*Autore: prof. **Pappalardo Vincenzo***

*docente di **Matematica e Fisica***



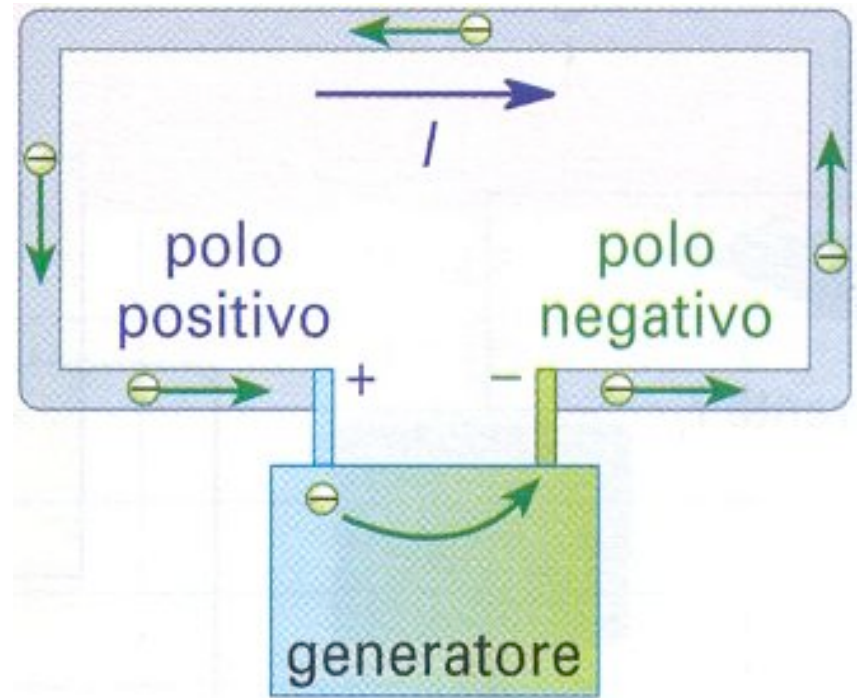
LA CORRENTE ELETTRICA E LA FORZA ELETTRICA



Nei metalli i portatori di carica in movimento sono gli **elettroni di conduzione**. Come le molecole di un gas, gli elettroni di conduzione si muovono in modo caotico, con una velocità media dell'ordine di 10^5 ms.

Questo moto disordinato, chiamato **moto di agitazione termica**, non costituisce una corrente elettrica, in quanto per ogni elettrone che si muove in un verso ne esiste sempre un altro che si muove in verso opposto.

La situazione cambia se agli estremi del conduttore si applica una differenza di potenziale (ddp) fornita da una sorgente elettrica (generatore).

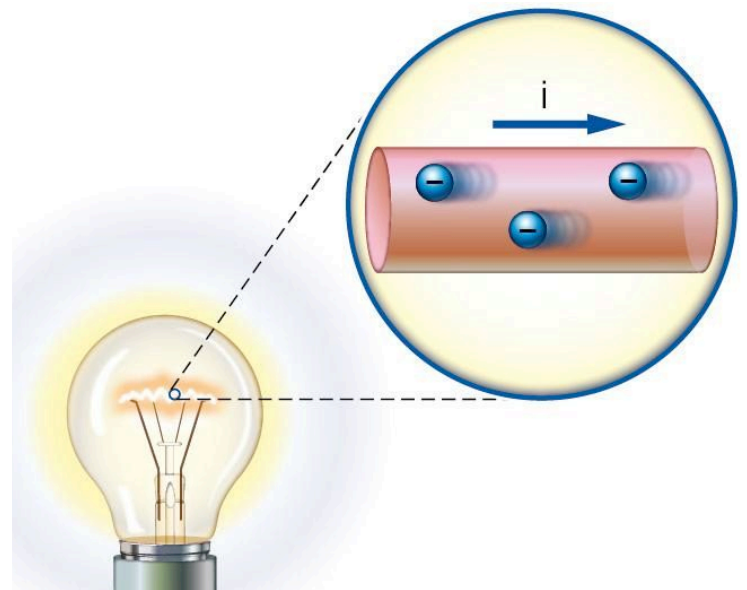


All'interno del conduttore, non più in condizioni di equilibrio elettrostatico, si stabilisce un campo elettrico e gli elettroni di conduzione assumono una velocità nella stessa direzione e in verso opposto rispetto al campo.

Tale velocità (**velocità di deriva**), è dell'ordine di 10^{-4} m/s, molto più piccola della velocità di agitazione termica ma sufficiente a far sì che il moto ordinato d'insieme dei portatori di carica manifesti concretamente i suoi effetti (lampadine che si accendono, altoparlanti che emettono suoni, stufe che riscaldano, ecc.).

*Il conduttore è percorso da una **corrente elettrica**.*

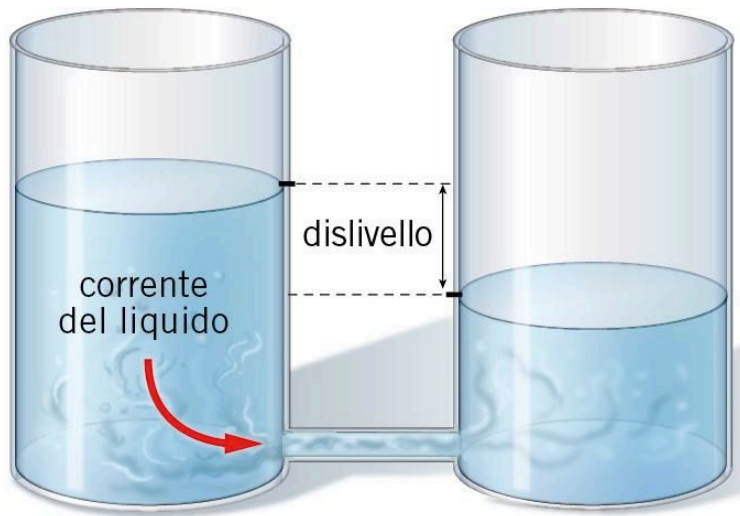
*La **corrente elettrica** è un moto ordinato di cariche elettriche.*



Nonostante la lentezza del moto degli elettroni, il segnale elettrico si propaga alla velocità della luce.

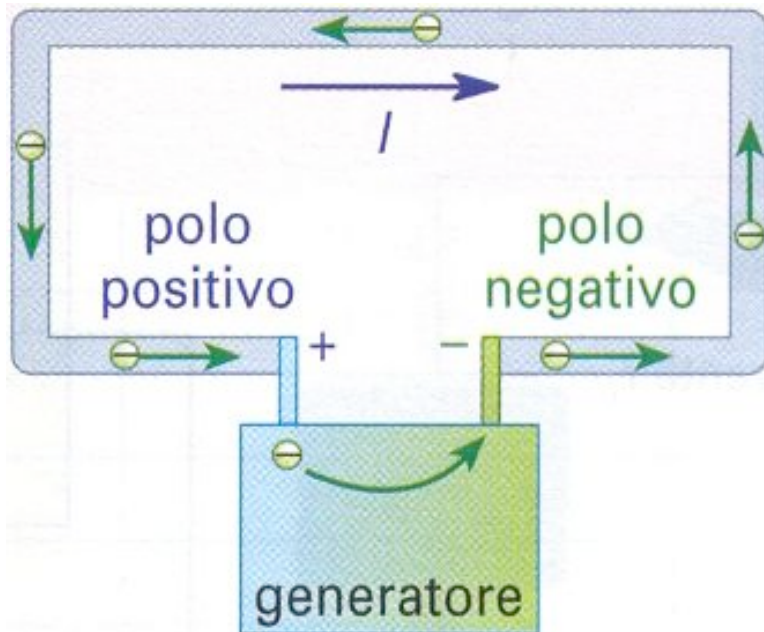
Il segnale non è trasportato dalle cariche, ma dal campo elettrico, che nei conduttori metallici si propaga praticamente alla velocità della luce nel vuoto.

In altri sistemi che conducono elettricità, il trasporto del segnale può essere più lento. Per esempio, lungo gli assoni delle cellule nervose dell'uomo e degli animali il segnale elettrico si propaga con una velocità di appena 30 m/s. In tal caso il meccanismo di conduzione implica il movimento di ioni e non di elettroni.



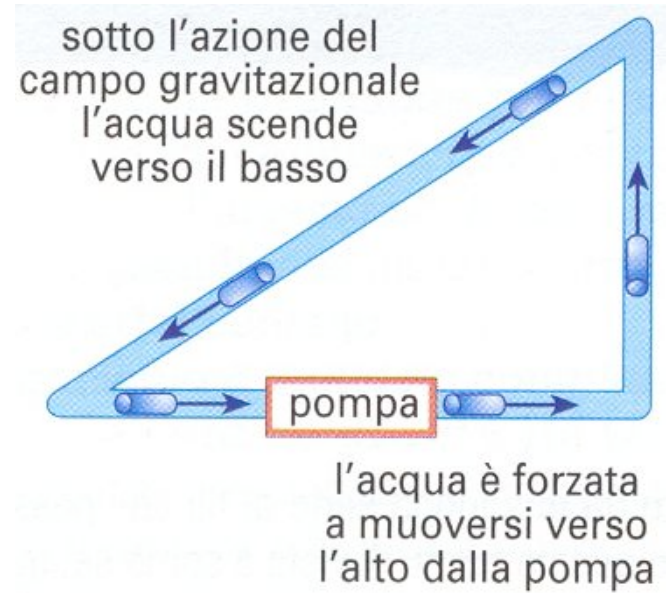
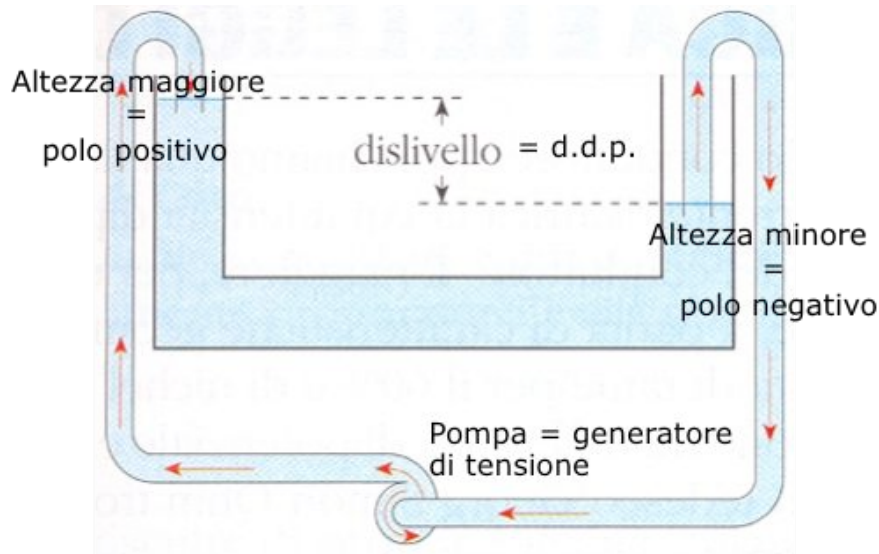
Esiste un'analogia tra la corrente elettrica e un liquido.

Per far scorrere l'acqua è necessario un dislivello (differenza di potenziale gravitazionale).



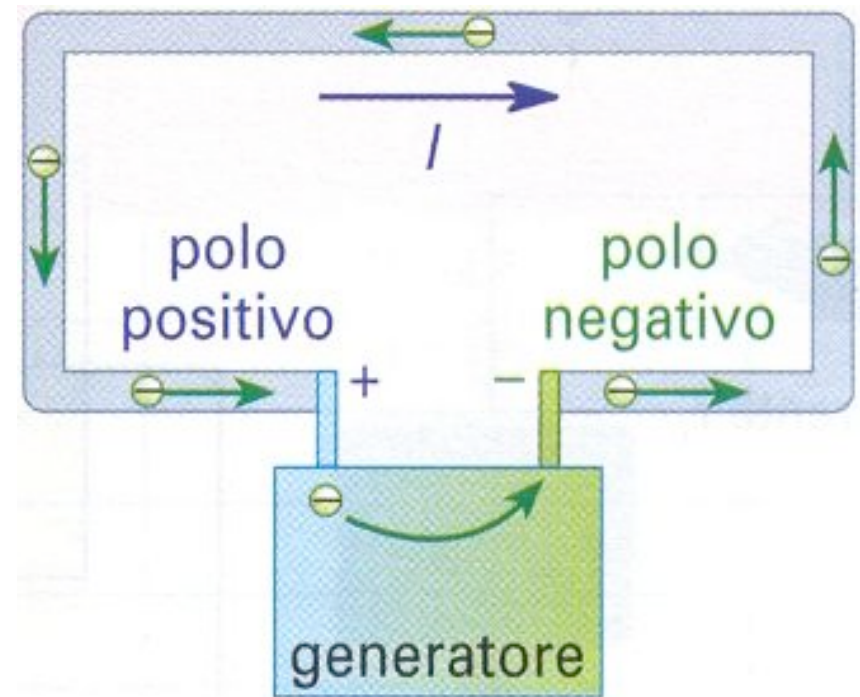
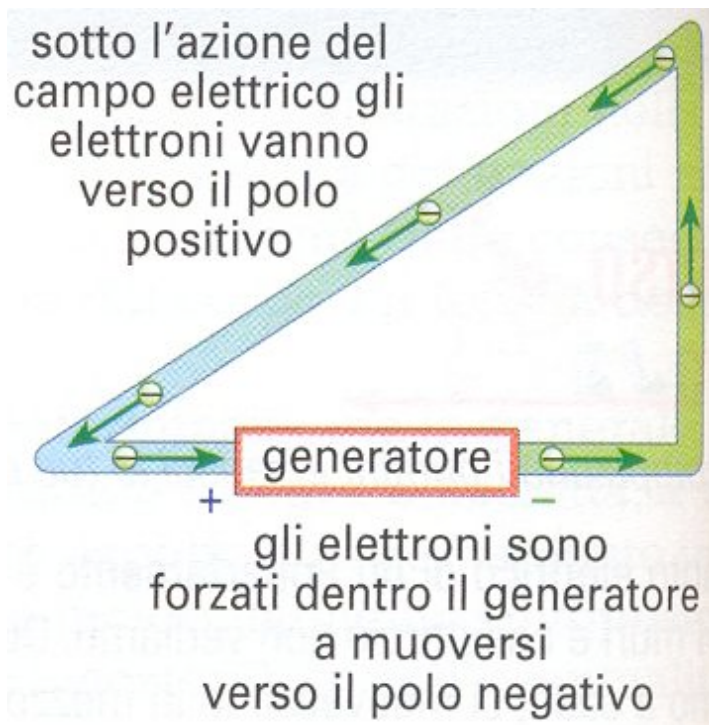
Per far muovere le cariche è necessario un dislivello elettrico (differenza di potenziale elettrico).

Per essere più precisi, Il ruolo di un generatore in un circuito elettrico è analogo a quello di una pompa in un circuito idraulico.



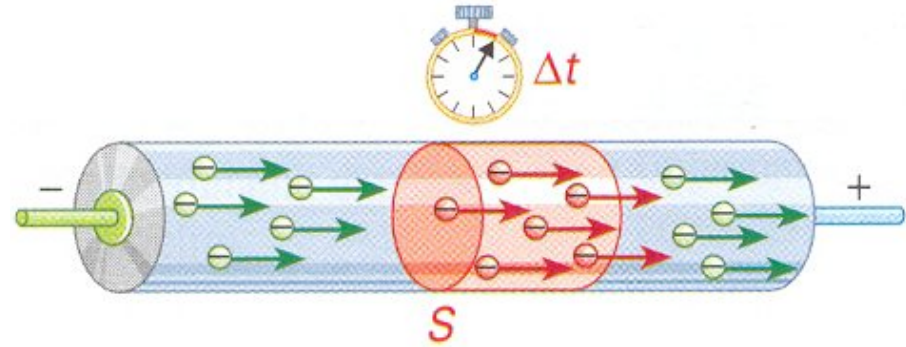
Affinché il flusso continui, dobbiamo mantenere costante il dislivello mediante una pompa che sposta il liquido verso l'alto, e deve compiere, contro la forza gravitazionale, un lavoro uguale all'aumento di energia potenziale del liquido ($L = -\Delta U$).

In modo analogo, un generatore deve compiere un lavoro L contro la forza del campo elettrico per portare una quantità di carica negativa Q dal polo negativo al polo positivo.



Cerchiamo adesso di trovare il modo di quantificare questa corrente elettrica.

Consideriamo una sezione trasversale S di un filo attraversato da una corrente elettrica in un certo intervallo di tempo.



INTENSITA' DI CORRENTE ELETTRICA

E' il rapporto tra la quantità di carica elettrica che attraversa una sezione qualsiasi del conduttore e l'intervallo di tempo in cui ciò avviene:

intensità di corrente
elettrica (A)

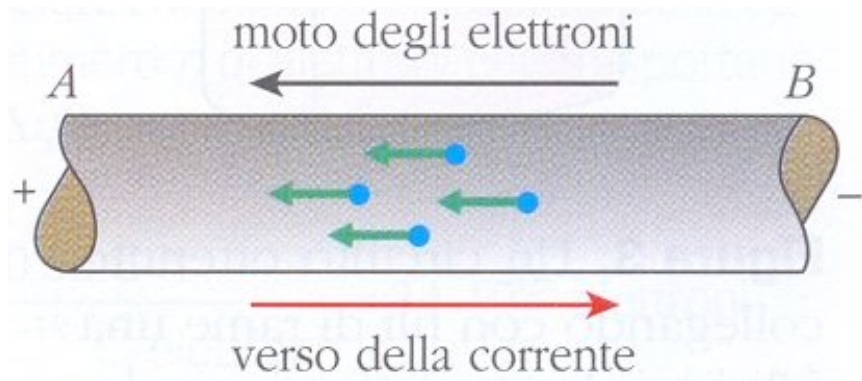
carica elettrica (C)

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

Unità di misura: Ampère [A]

intervallo di tempo (s)

Agli inizi del secolo XIX, quando venne data la definizione di corrente, non erano ancora stati scoperti gli elettroni e si definì come *verso convenzionale* della corrente quello secondo cui si muovono le cariche positive, cioè il verso del campo elettrico.

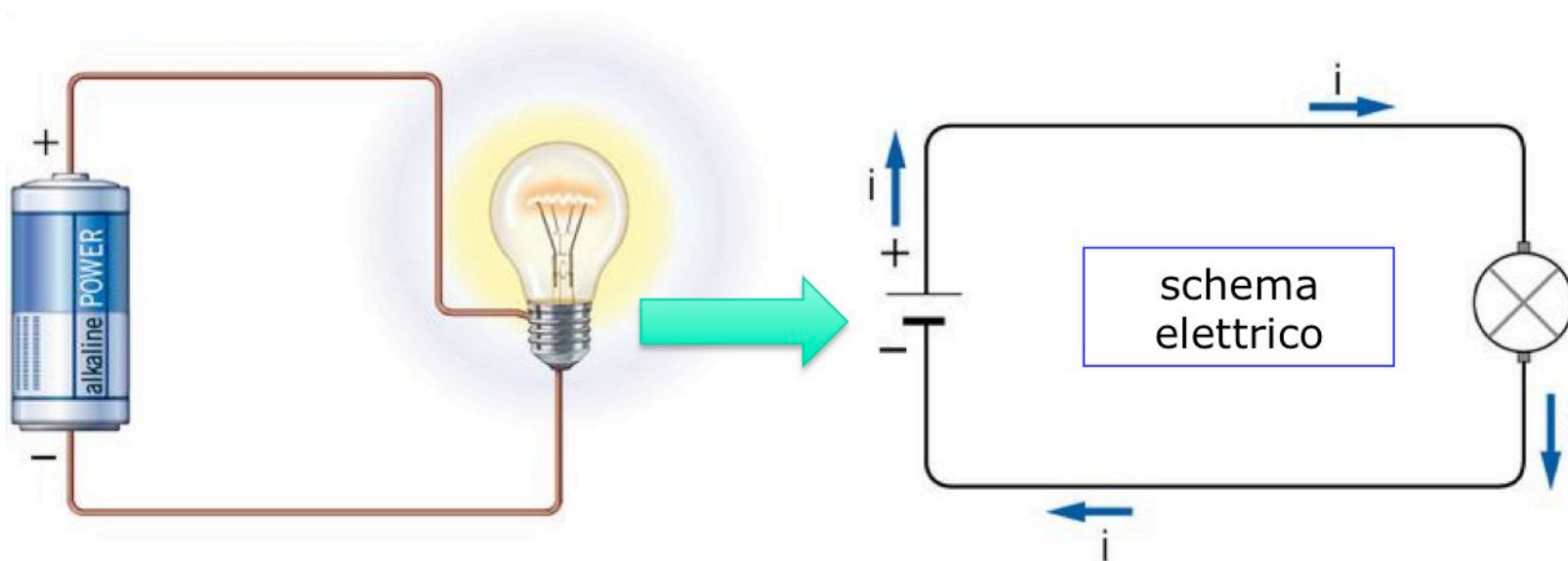


Noi manteniamo tale convenzione, per cui quando diciamo che un filo metallico è percorso da una corrente elettrica dall'estremo A all'estremo B, ciò vuol dire che nel filo esiste un flusso di elettroni in verso opposto, cioè da B ad A.

PRIMA LEGGE DI OHM

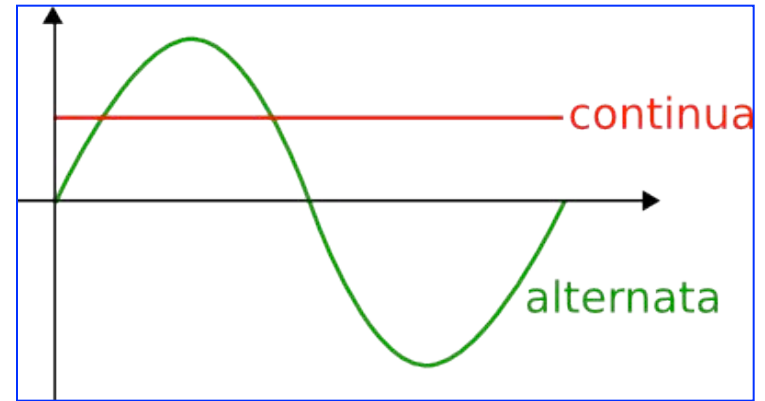
Un circuito elettrico è un insieme di conduttori il cui scopo è quello di collegare un utilizzatore (per esempio una lampadina) a un generatore di tensione.

Il più semplice circuito elettrico che possiamo immaginare è il seguente:



La corrente che fluisce nel circuito elettrico è **corrente continua**:

Una corrente si dice continua quando la sua intensità è costante nel tempo.

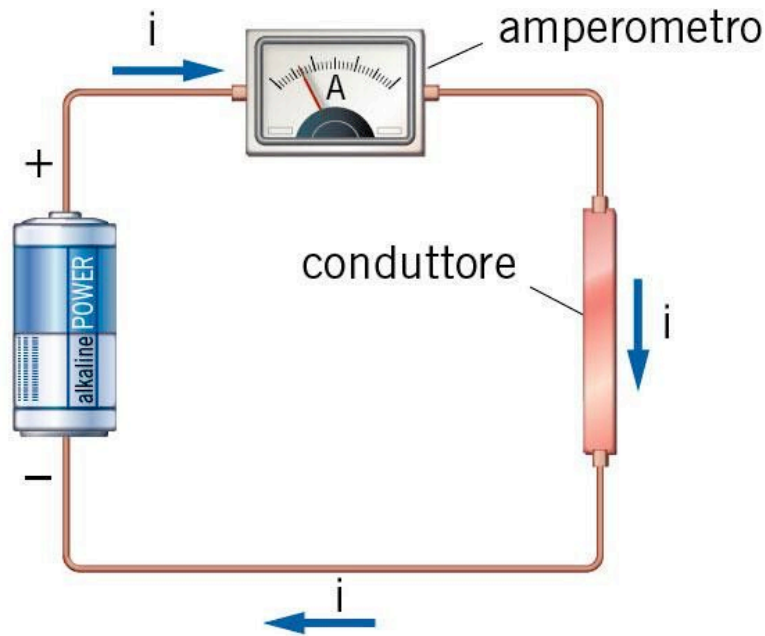


Il generatore utilizzato per mantenere la corrente elettrica nel circuito è un **generatore ideale di tensione continua**:

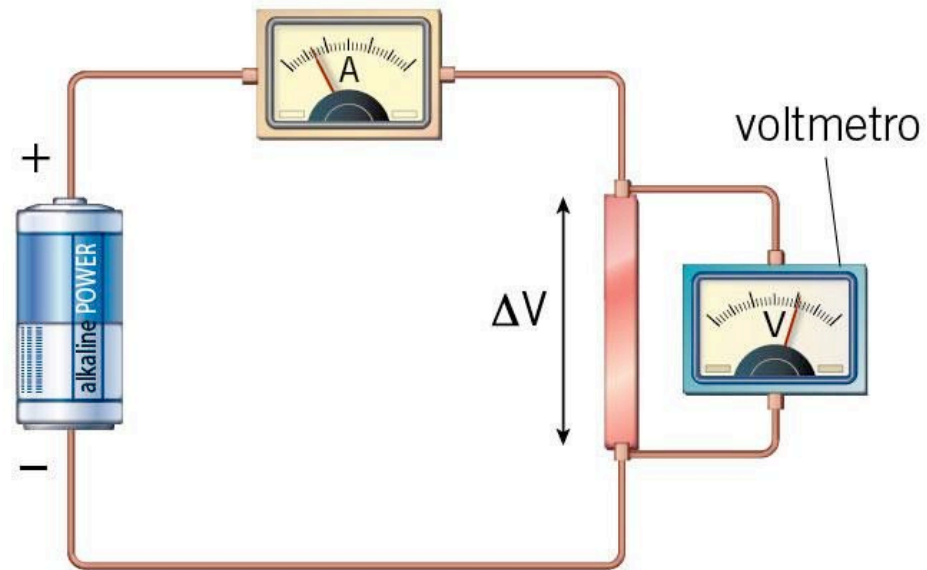
Il generatore ideale di tensione continua è un dispositivo capace di mantenere ai suoi capi una differenza di potenziale (ddp) costante nel tempo.

Ricaviamo le leggi che caratterizzano i circuiti elettrici.

Eseguiamo il seguente esperimento in cui vogliamo studiare come varia la corrente elettrica in un conduttore al variare della ddp ai suoi capi.



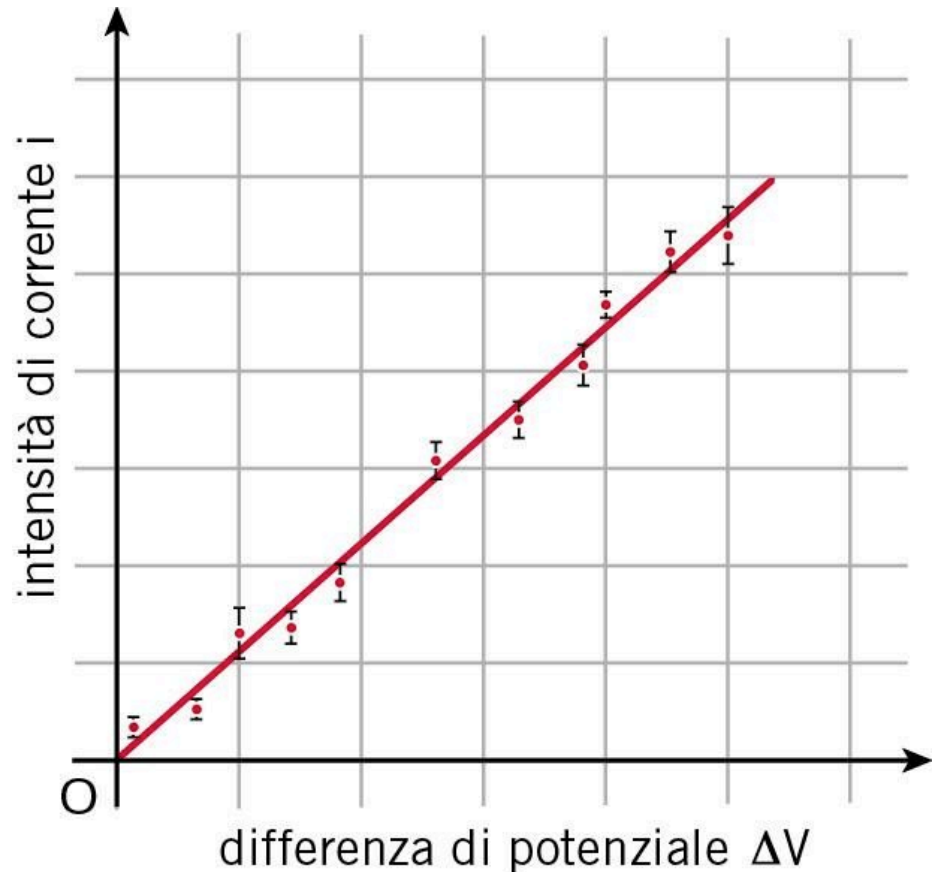
Misuriamo la corrente che attraversa il conduttore con un amperometro.



Misuriamo la ddp ai capi del conduttore con un voltmetro.

Ripetiamo l'esperimento per vari valori di tensione delle batterie e riportiamo i dati sperimentali in un diagramma corrente-tensione. Si ottiene la cosiddetta **curva caratteristica** del conduttore.

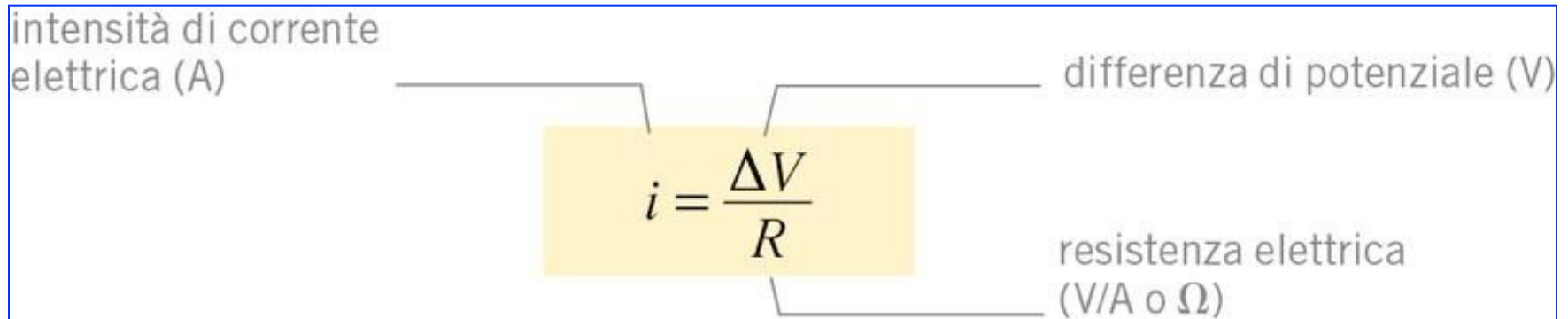
Il fisico tedesco **Ohm** (1775-1836) verificò sperimentalmente che per i conduttori metallici (ma anche per certe soluzioni), detti ohmici, la curva caratteristica è una retta.



Questo significa che tra corrente e tensione esiste una proporzionalità diretta, che è espressa dalla seguente legge:

PRIMA LEGGE DI OHM

A temperatura costante, nei conduttori ohmici l'intensità di corrente è direttamente proporzionale alla ddp applicata ai loro capi:



The diagram shows the equation $i = \frac{\Delta V}{R}$ centered within a yellow rectangular box. Three lines extend from the box to labels: one from the left side to the label 'intensità di corrente elettrica (A)', one from the top right to the label 'differenza di potenziale (V)', and one from the bottom right to the label 'resistenza elettrica (V/A o Ω)'.

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

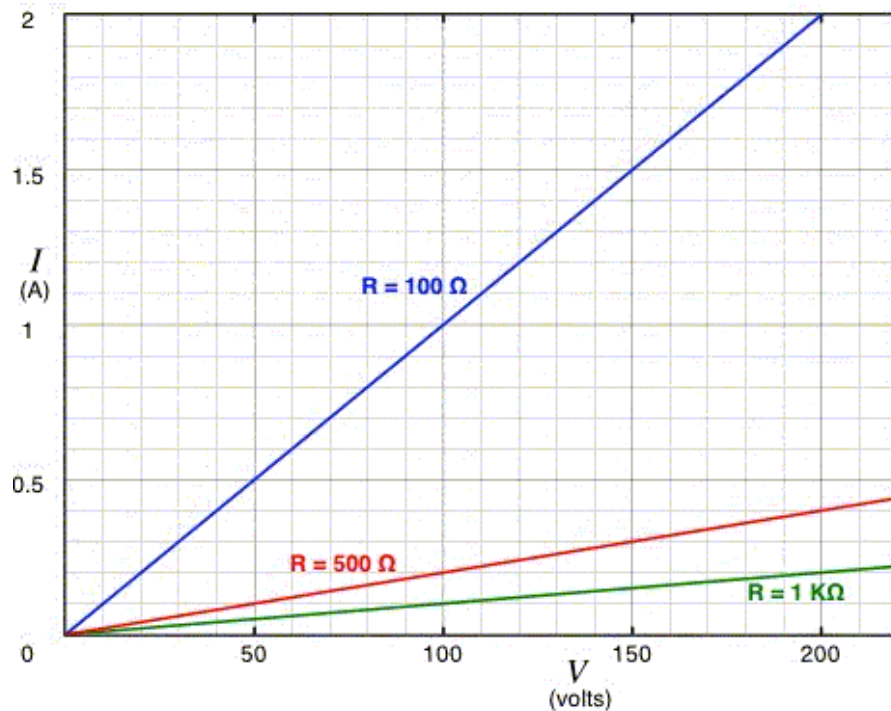
intensità di corrente elettrica (A)

differenza di potenziale (V)

resistenza elettrica (V/A o Ω)

La costante di proporzionalità ***R*** è chiamata **resistenza elettrica del conduttore**.

La resistenza R (unità di misura nel SI è l'ohm $[\Omega]$), è una misura della resistenza che il conduttore oppone al passaggio della corrente elettrica. Infatti, per una determinata differenza di potenziale, più grande è R , meno intensa è la corrente che scorre nel conduttore.



$1/R = \text{pendenza della retta}$

A pendenza maggiore
corrisponde resistenza
minore.

Il componente elettrico che segue la prima legge di Ohm si chiama **resistore**.

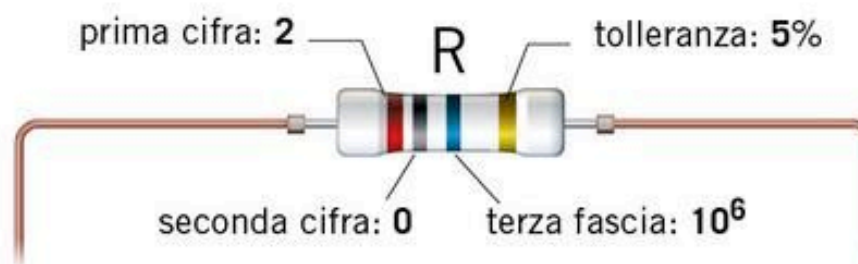
Esempi di resistori sono i fili di rame, usati per costruire i circuiti elettrici.

Il simbolo della resistenza è il seguente:



Spesso, questi resistori presentano una serie di anelli colorati che indicano il valore della resistenza.

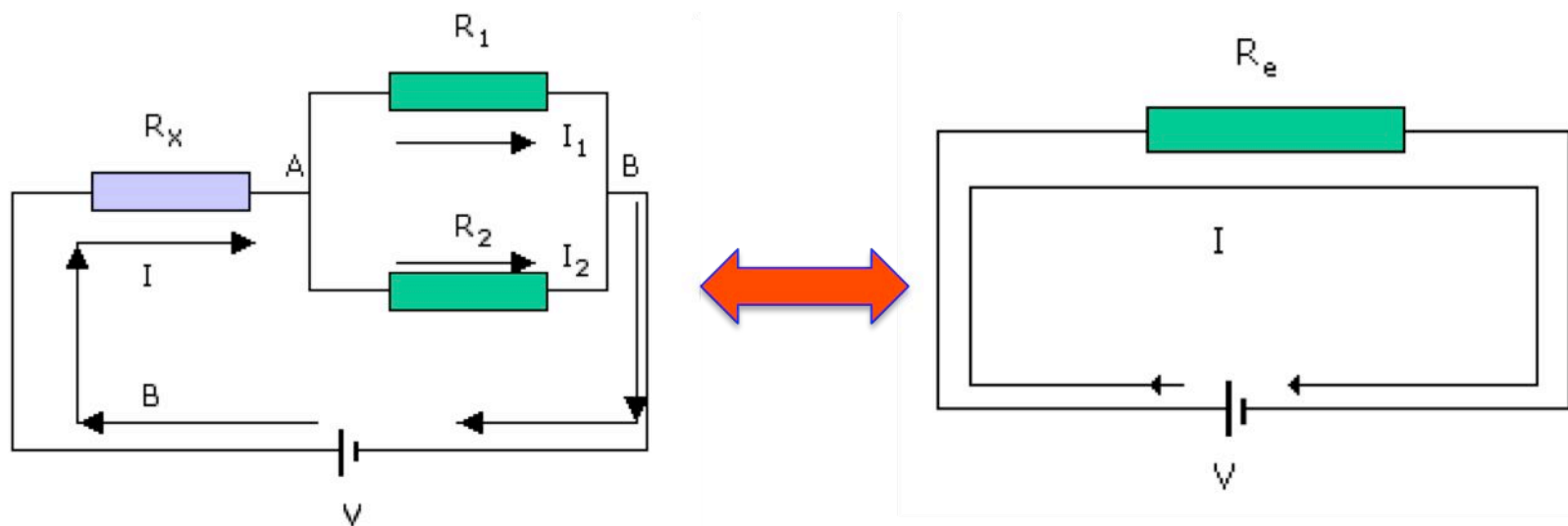
	anello 1 CIFRA	anello 2 CIFRA	anello 3 MULTIPLICATORE	anello 4 TOLLERANZA
NERO	–	0	1	–
MARRONE	1	1	10	–
ROSSO	2	2	10^2	–
ARANCIO	3	3	10^3	–
GIALLO	4	4	10^4	–
VERDE	5	5	10^5	–
BLU	6	6	10^6	–
VIOLA	7	7	10^7	–
GRIGIO	8	8	10^8	–
BIANCO	9	9	10^9	–
ORO	–	–	10^{21}	5%
ARGENTO	–	–	10^{22}	10%



$$R = (20 \pm 1) \times 10^6 \, \Omega = (20 \pm 1) \, \text{M}\Omega$$

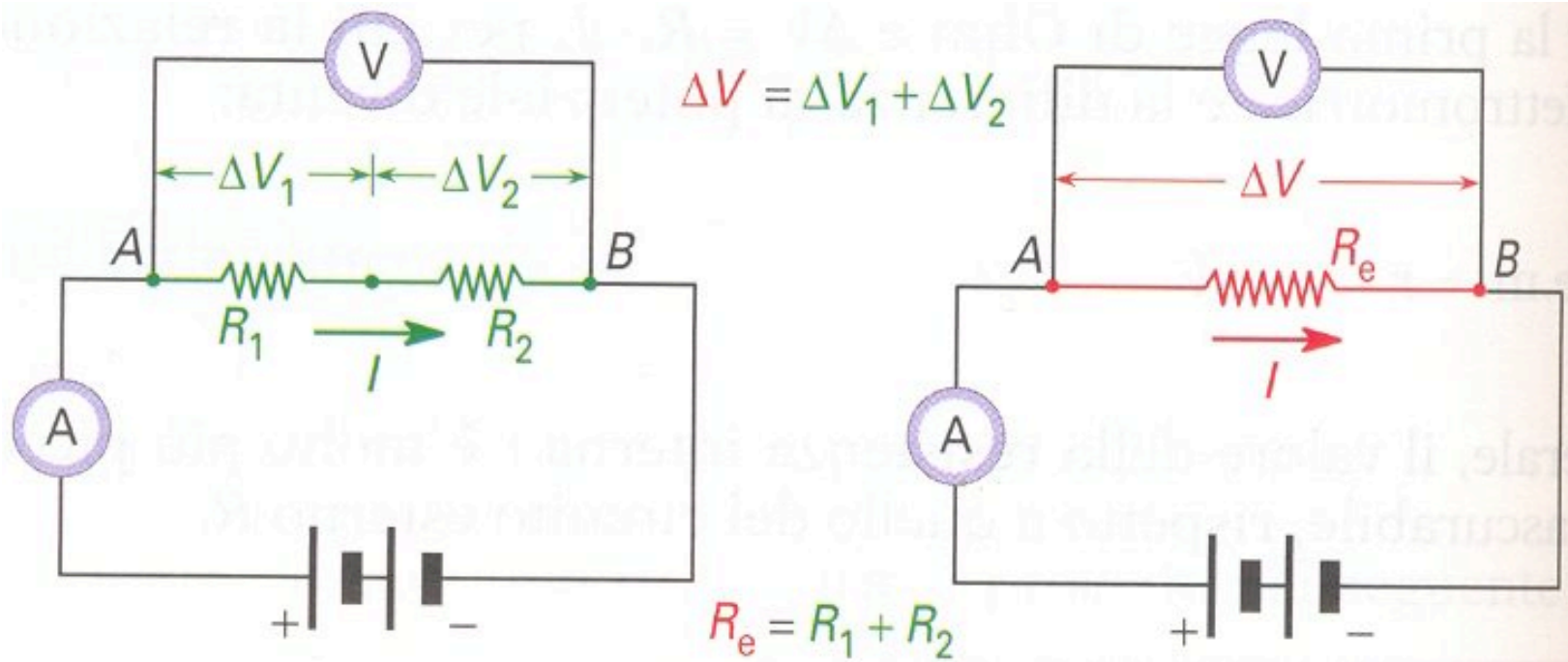
CIRCUITI ELETTRICI IN CORRENTE CONTINUA

Consideriamo il seguente circuito elettrico:



La **resistenza equivalente** R_e della rete di resistenze è quella singola resistenza che, sottoposta alla stessa ddp V a cui è soggetta l'intera rete, assorbe dal generatore la stessa corrente I .

Resistenze in serie



Due o più resistenze sono collegate in **serie** quando sono attraversate dalla stessa intensità di corrente I .

COLLEGAMENTO DI RESISTENZE IN SERIE

Due o più resistori collegati in serie sono equivalenti a un unico resistore avente una resistenza R_e pari alla somma delle resistenze dei singoli resistori.

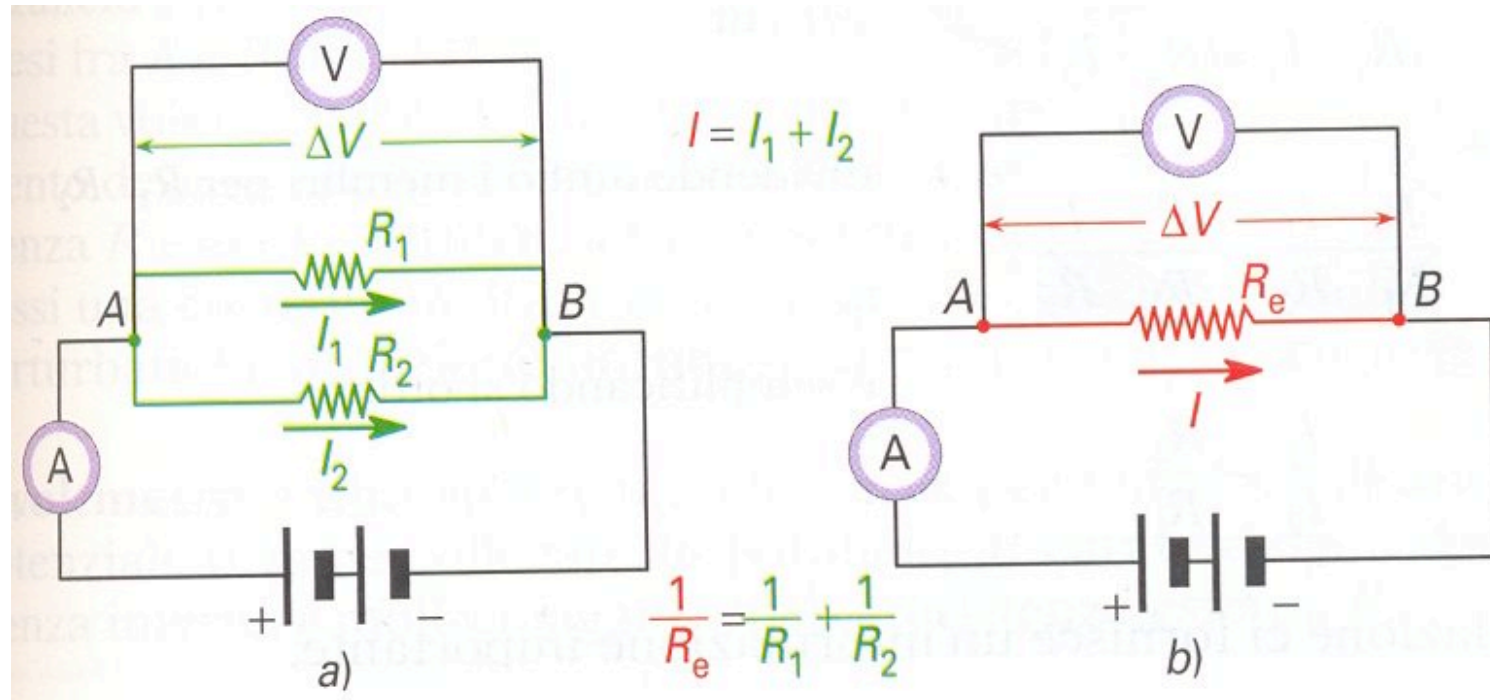
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots = \sum R_i$$

La ddp agli estremi di tale resistore è uguale alla somma delle cadute di tensione su tutti i resistori e l'intensità di corrente che lo attraversa è uguale a quella che scorre in ogni resistore:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots$$

$$i_1 = i_2 = \dots = i_n$$

Resistenze in parallelo



Due o più resistenze sono collegate in **parallelo** quando sono sottoposte alla stessa ddp ΔV .

COLLEGAMENTO DI RESISTENZE IN PARALLELO

Due o più resistori collegati in parallelo sono equivalenti a un unico resistore avente una resistenza R_e il cui reciproco è uguale alla somma dei reciproci delle singole resistenze:

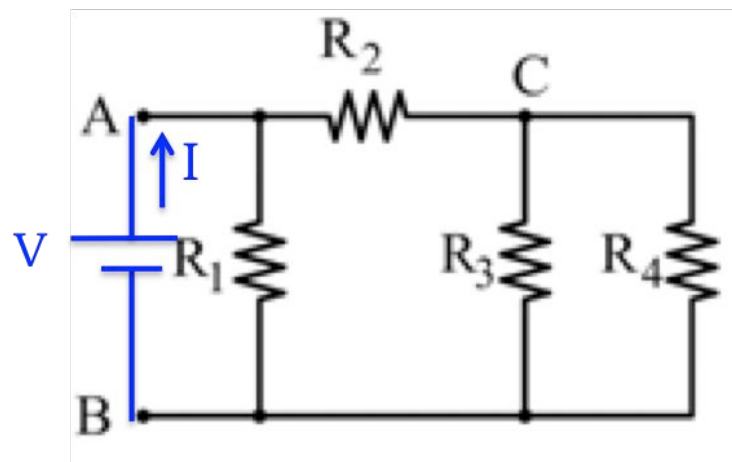
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots = \sum \frac{1}{R_i}$$

La ddp agli estremi di tale resistore è uguale a quella esistente fra gli estremi di ciascun resistore e la corrente che lo attraversa è pari alla somma delle intensità di corrente che attraversano le singole resistenze:

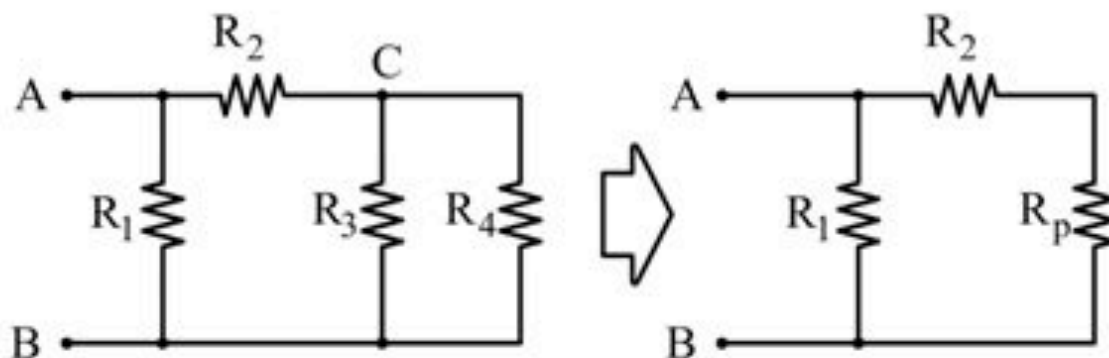
$$\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2 = \dots$$

$$i = i_1 + i_2 + \dots = \sum i_i$$

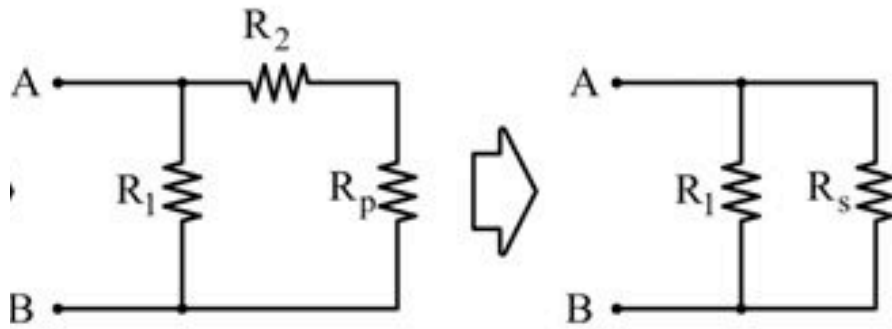
Esempio. Calcolare la corrente erogata dal generatore $V=220\text{ V}$.



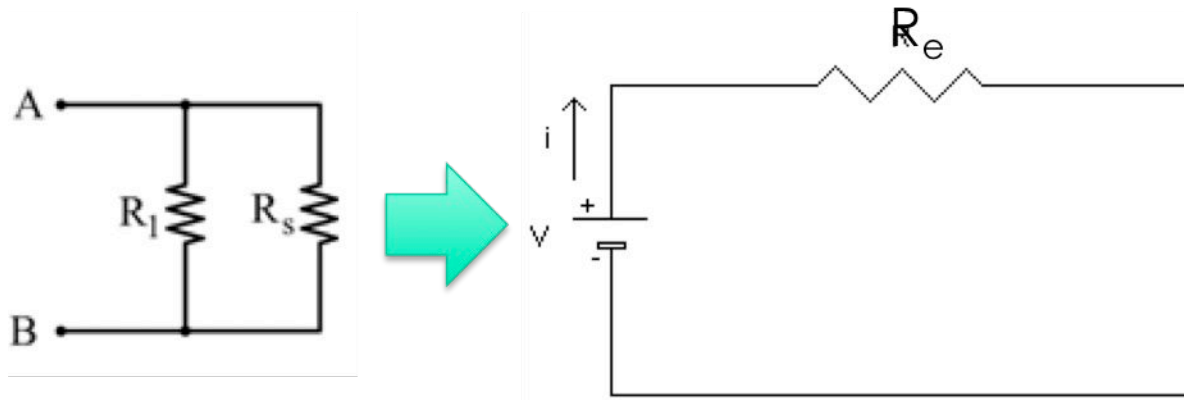
$$\begin{aligned} R_1 &= 3 \text{ k}\Omega & R_2 &= 1,2 \text{ }\Omega \\ R_3 &= 2 \text{ k}\Omega & R_4 &= 400 \text{ }\Omega \end{aligned}$$



$$R_p = R_3 // R_4 = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{22 \cdot 0,4}{22,4} = 0,392 \text{ k}\Omega$$



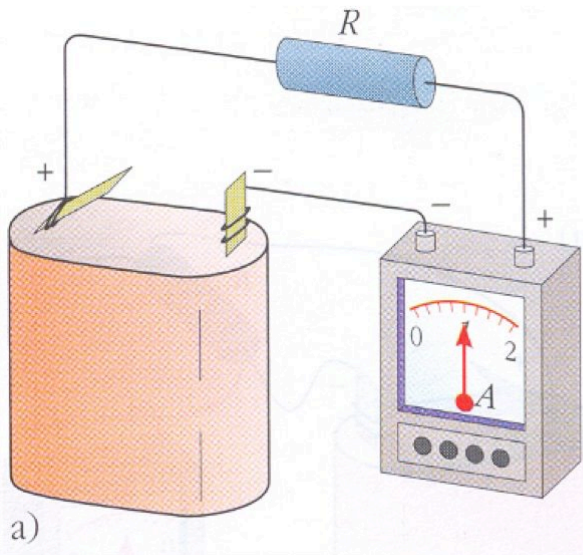
$$R_s = R_2 + R_p = 1,2 + 0,392 = 1,592 \text{ k}\Omega$$



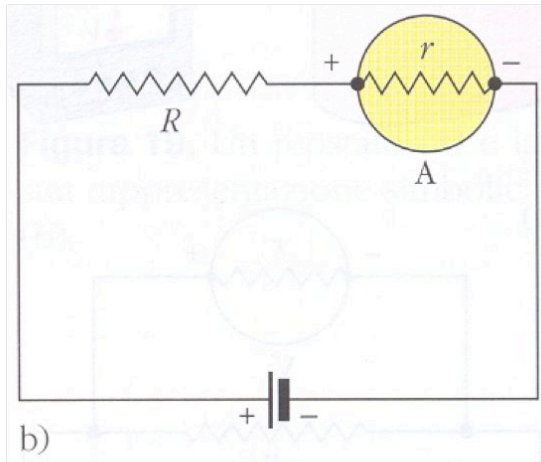
$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s} \Rightarrow R_e = \frac{R_1 \cdot R_s}{R_1 + R_s} = \frac{3 \cdot 1,592}{3 + 1,592} = 1,04 \text{ k}\Omega$$

$$1^a \text{ legge di Ohm} \Rightarrow I = \frac{V}{R_e} = \frac{220}{1,04 \cdot 10^3} = 0,21 \text{ A}$$

STRUMENTI DI MISURA

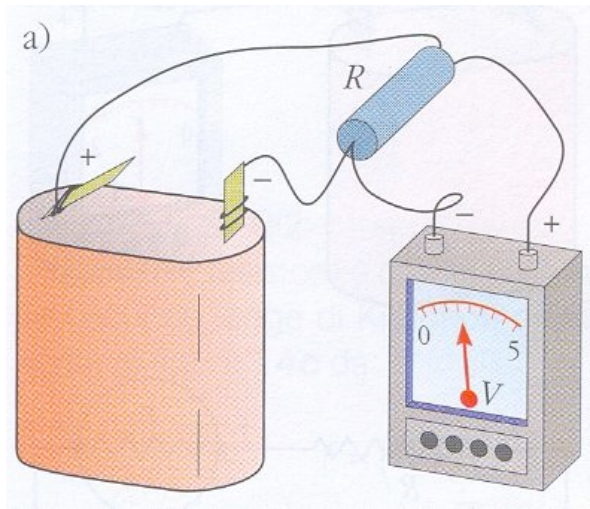


L' amperometro è uno strumento che misura l'intensità di corrente e viene collegato in serie. È caratterizzato da una resistenza interna r molto minore della resistenza esterna R .

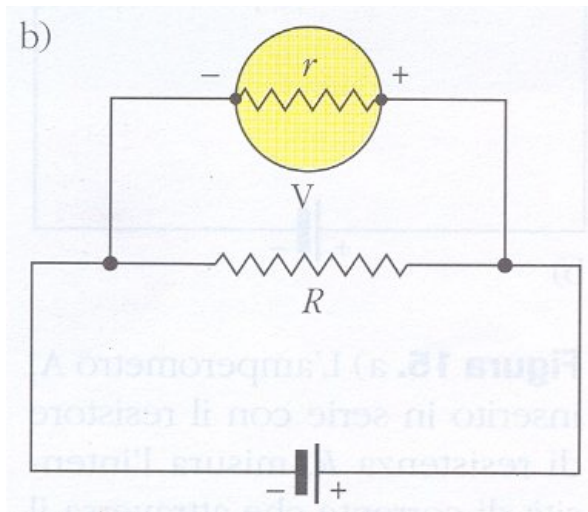


La resistenza interna dell'amperometro deve essere piccola affinché, con il suo inserimento, non si modifichi la corrente che si vuole misurare.

Fare attenzione a collegare il morsetto positivo con il polo positivo del generatore e il morsetto negativo con il polo negativo.



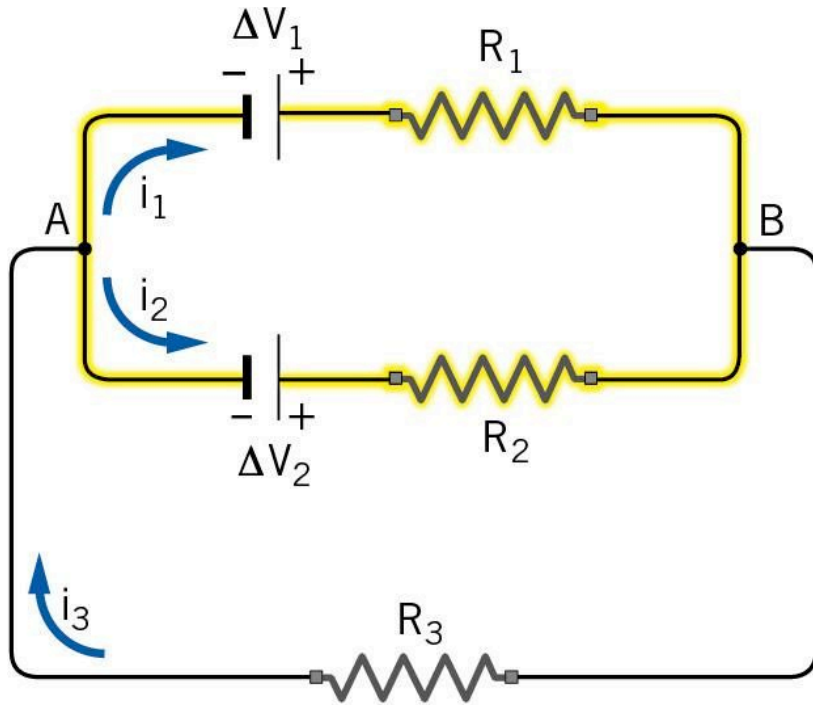
Il voltmetro è uno strumento che misura la ddp e viene collegato in parallelo. È caratterizzato da una resistenza interna r molto maggiore della resistenza esterna R .



La resistenza interna del voltmetro deve essere grande affinché, con il suo inserimento, non modifichi la corrente nel circuito e quindi la ddp ai capi di R che si vuole misurare.

Fare attenzione a collegare bene il voltmetro.

RISOLUZIONE DEI CIRCUITI ELETTRICI



Nelle applicazioni spesso si incontrano circuiti elettrici in cui sono presenti più generatori e resistenze.

Risolvere un circuito elettrico significa determinare il valore e il verso di tutte le correnti presenti e, di conseguenza, il valore delle tensioni ai capi di tutte le resistenze.

PRINCIPI DI KIRCHOFF (1824-1887)

1° PRINCIPIO DI KIRCHHOFF (legge dei nodi)

La somma delle correnti entranti
in un nodo è uguale alla somma
delle correnti uscenti:

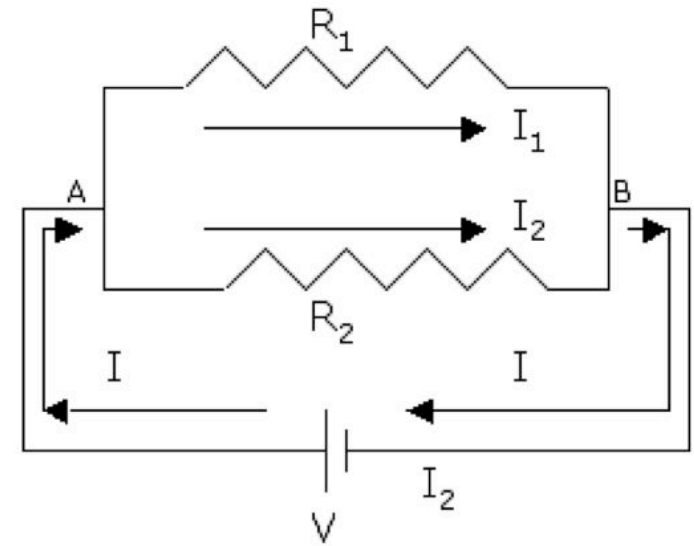
$$\sum I_{entranti} = \sum I_{uscenti}$$

$$I = I_1 + I_2$$

I = corrente entrante nodo A

I_1 = corrente uscente nodo A

I_2 = corrente uscente nodo A



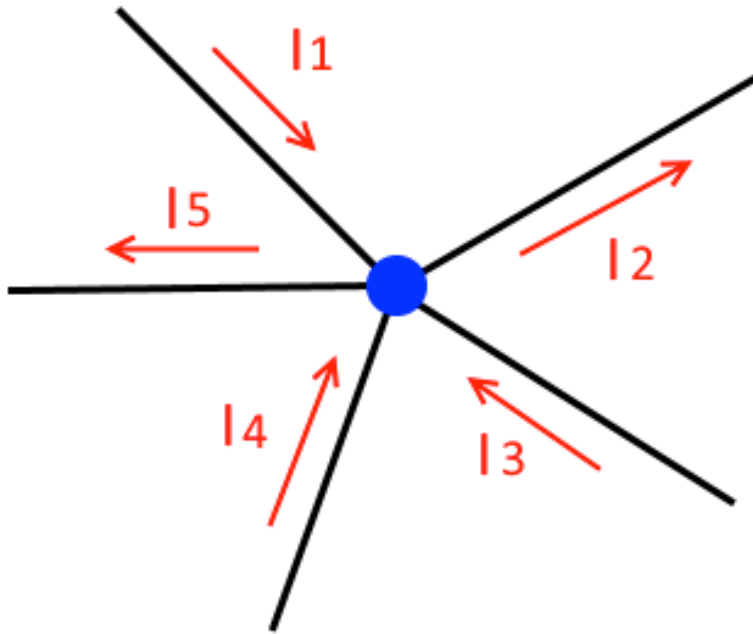
Nodo: punto (A e B) di un circuito in cui confluiscano, o da cui si diramano, più di due rami di un circuito.

$$I = I_1 + I_2$$

I = corrente uscente nodo B

I_1 = corrente uscente nodo B

I_2 = corrente uscente nodo B



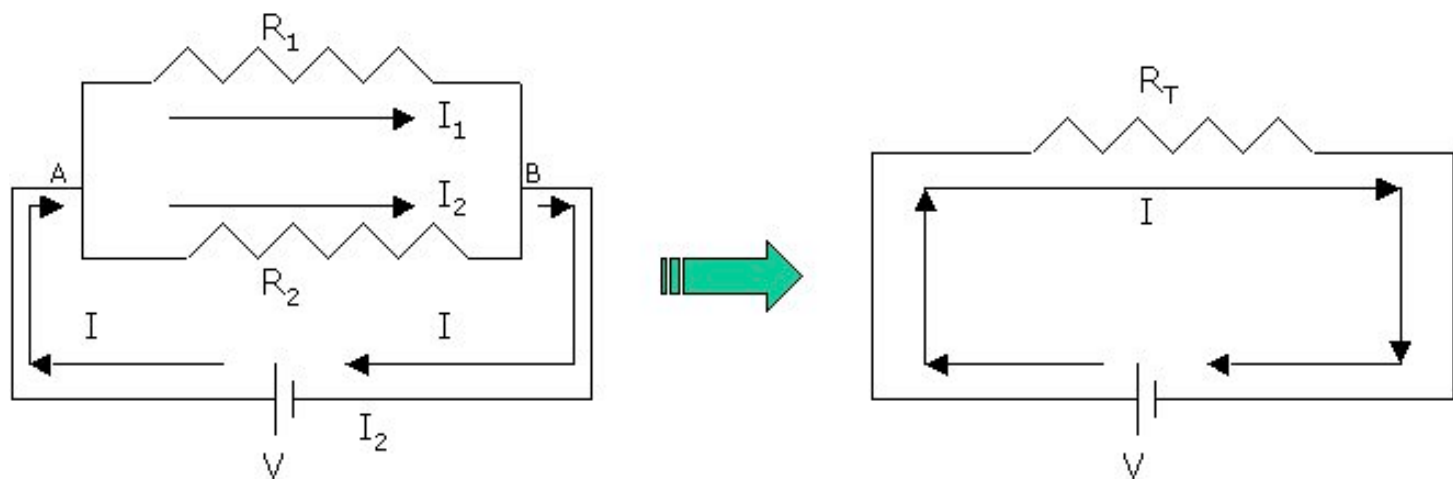
Il primo principio di Kirchhoff
è una conseguenza del
principio di conservazione
della carica elettrica.

Infatti, adottando la convenzione di considerare positive le correnti entranti nel nodo (I_1, I_3, I_4) e negative quelle uscenti (I_2, I_5), si deve avere:

$$I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 = 0 \xrightarrow{\text{da cui}} I_1 + I_3 + I_4 = I_2 + I_5$$

ESEMPIO

Due resistenze, 7Ω e 13Ω , sono collegate in parallelo e alimentate da una tensione di $12V$. Calcolare l'intensità di corrente erogata dal generatore e quella che attraversa ogni singola resistenza.



Per calcolare la corrente erogata dal generatore, dobbiamo prima determinare la resistenza totale:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{7} + \frac{1}{13} = 0,22\Omega^{-1} \Rightarrow R_T = \frac{1}{0,22} = 4.5\Omega$$

Grazie alla legge di Ohm, si ottiene la corrente erogata dal generatore:

$$R_T = \frac{V}{I} \Rightarrow I = \frac{V}{R_T} = \frac{12}{4,5} = 2,7A$$

Poiché le due resistenze sono in parallelo, e quindi sottoposte alla stessa differenziale di potenziale del generatore, la corrente che le attraversa sarà:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{12}{7} = 1,7A$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{12}{13} = 0,9A$$

Quindi:

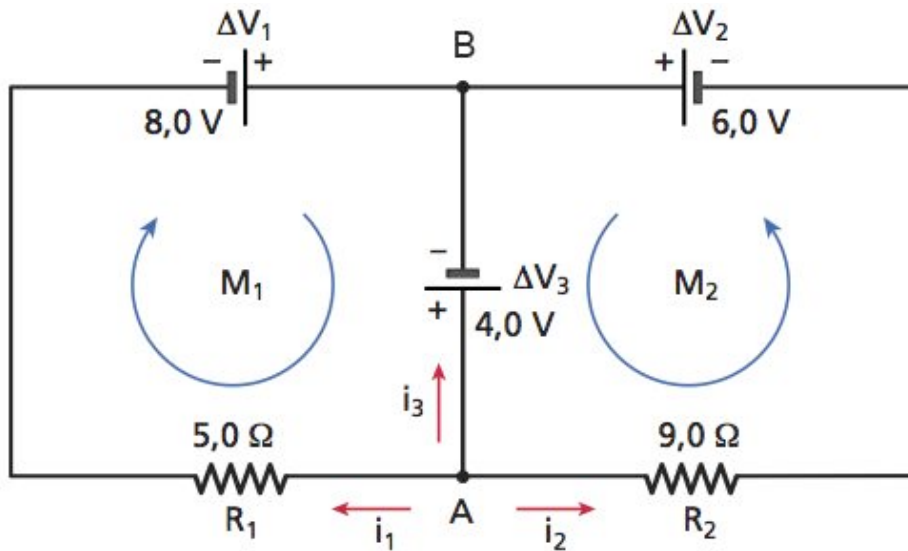
$$I = I_1 + I_2 = 2,7A$$

Questo risultato esprime il:
1° principio di Kirchhoff

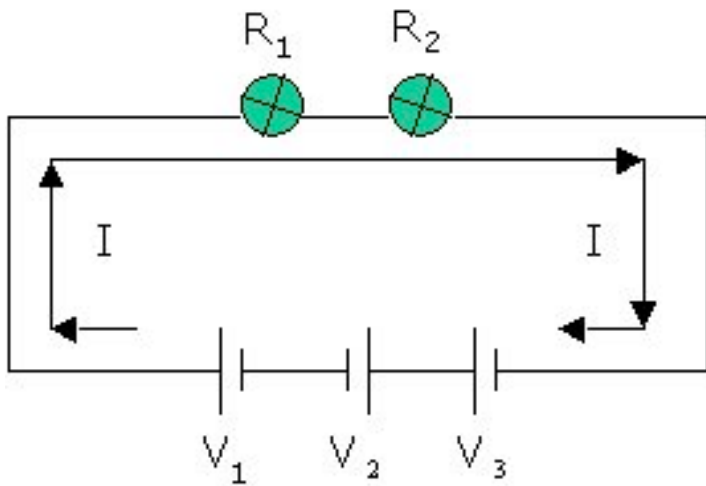
2° PRINCIPIO DI KIRCHHOFF (legge delle maglie)

La somma algebrica delle fem ΔV applicate in un circuito è uguale alla somma delle cadute di tensione $V_R = R \cdot I$ provocate dal passaggio della corrente nelle resistenze presenti nel circuito:

$$\sum \Delta V = \sum V_R$$



Maglia: è un tratto chiuso di circuito (M_1 e M_2), ed è fatta di più rami che connettono due nodi.



Il 2° principio di Kirchhoff può essere scritto anche come:

$$\Delta V_{totale} = \sum_{i=1}^n \Delta V_i = 0$$

La legge delle maglie esprime il fatto che, descrivendo un percorso chiuso lungo il circuito, ritorniamo allo stesso potenziale di partenza.

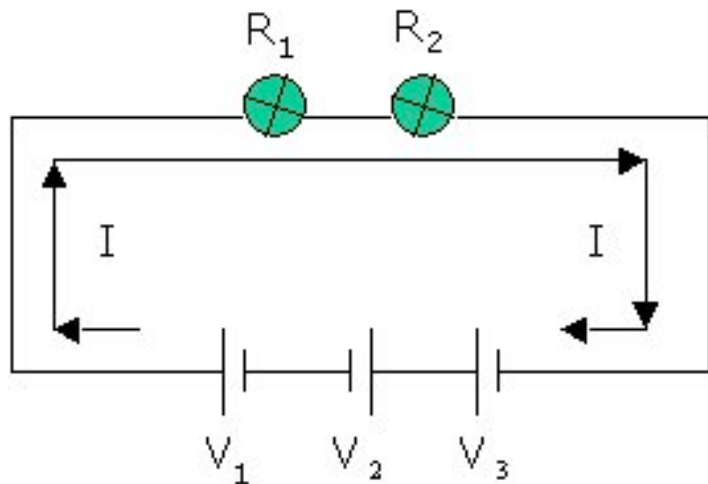
Una carica q che percorre l'intera maglia, al termine del percorso avrà la stessa energia potenziale che aveva all'inizio.

$$\Delta U_{tot} = q \Delta V_{totale} = 0$$

Il 2° principio di Kirchhoff è un'espressione del principio di conservazione dell'energia.

ESEMPIO

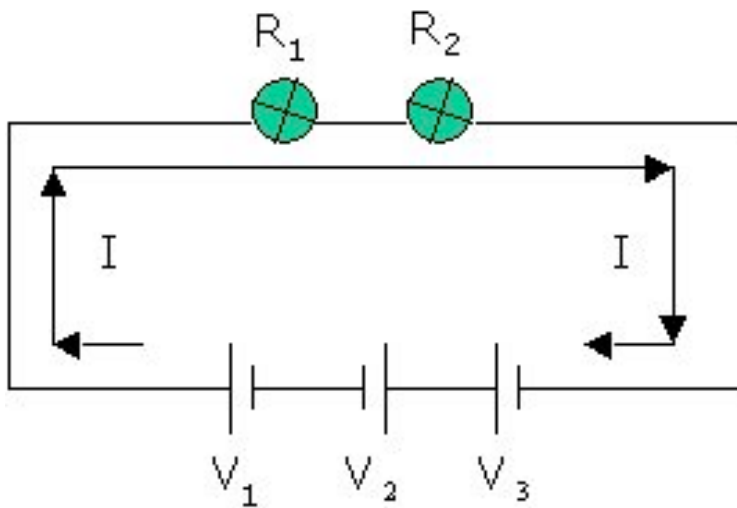
Due lampadine di 10Ω e di 5Ω collegate in serie sono alimentate da tre generatori di tensione di 10 V , 13 V e 7 V . Calcolare l'intensità di corrente che attraversa il circuito.



P o i c h é a g i s c o n o contemporaneamente tre generatori di tensione, non sappiamo il verso della corrente.

Convenzione

1. Il verso della corrente viene fissato a piacere: se il valore trovato è positivo, il verso fissato è quello giusto; se il valore trovato è negativo, il verso giusto è contrario a quello fissato.
2. La V è positiva se la corrente fissata va dal polo negativo al polo positivo; è negativa se la corrente va dal polo positivo al polo negativo.



Applichiamo il 2° principio di Kirchhoff alla maglia:

$$\sum \Delta V = \sum V_R$$

Il verso della corrente è stato scelto in senso orario, e, in base alla convenzione adottata, V_1 e V_3 sono positive, V_2 è negativa:

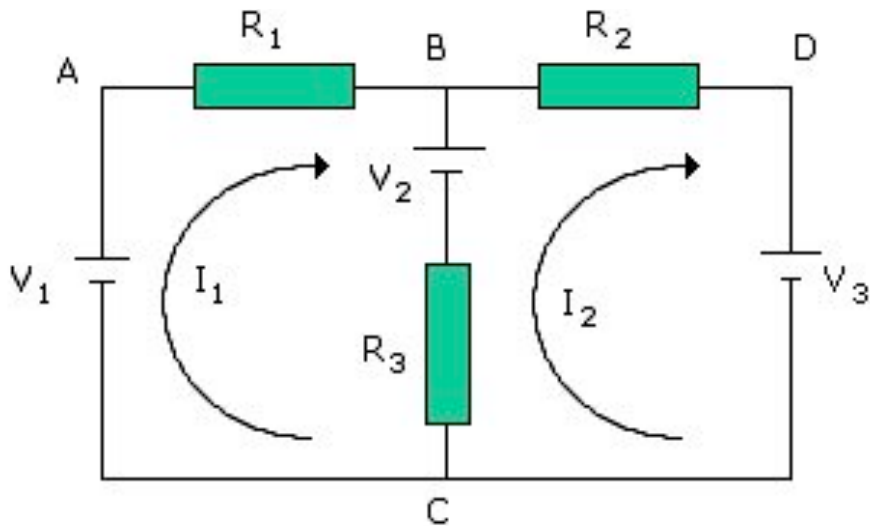
$$V_1 - V_2 + V_3 = (R_1 + R_2) \cdot I \Rightarrow I = \frac{V_1 - V_2 + V_3}{R_1 + R_2} = \frac{10 - 13 + 7}{10 + 5} = 0,27A$$

Poiché il valore trovato è positivo, il verso fissato alla corrente nel circuito è quello giusto.

ESEMPIO

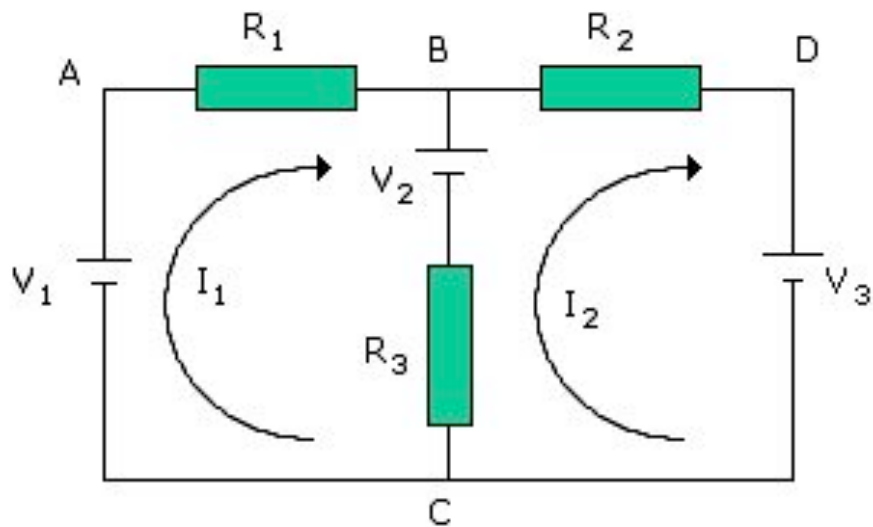
Dati circuitali: $V_1=10\text{ V}$ $V_2=7\text{ V}$ $V_3=20\text{ V}$
 $R_1=10\ \Omega$ $R_2=20\ \Omega$ $R_3=30\ \Omega$

Calcolare le correnti che attraversano i tre rami AB, BC, BD.



Il verso delle correnti di maglia I_1 e I_2 è stato fissato in senso orario.

La convenzione sul segno delle tensioni va applicata a ciascuna maglia.



Applichiamo il 2° principio di Kirchhoff alle due maglie:

$$\sum V = \sum R \cdot I \Rightarrow \begin{cases} V_1 - V_2 = R_1 I_1 + R_3 (I_1 - I_2) \\ V_2 - V_3 = R_2 I_2 + R_3 (I_2 - I_1) \end{cases}$$

Sistema di due equazioni in due incognite I_1 e I_2 .

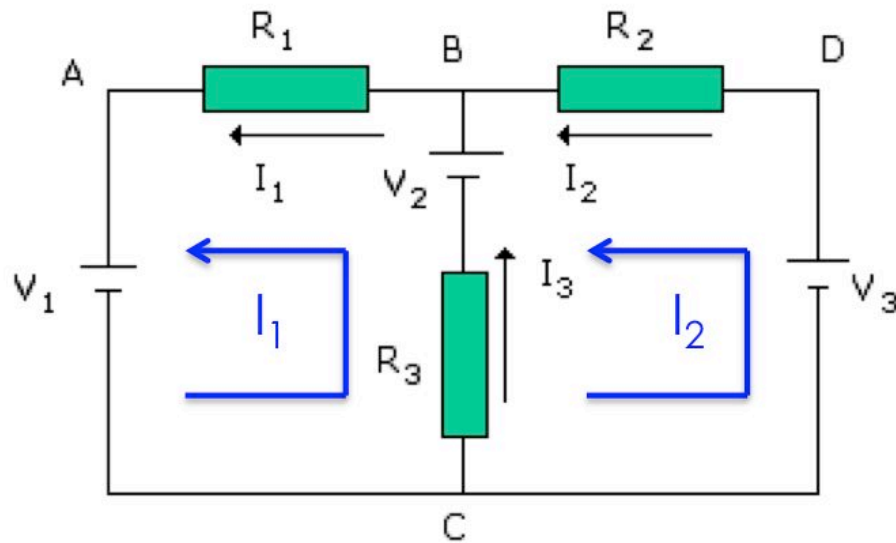
Sostituiamo i valori circuitali e risolviamo il sistema con il metodo di Cramer:

$$\begin{cases} 3 = 10I_1 + 30I_1 - 30I_2 \\ -13 = 20I_2 + 30I_2 - 30I_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 40I_1 - 30I_2 = 3 \\ 30I_1 - 50I_2 = 13 \end{cases}$$

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 3 & -30 \\ 13 & -50 \\ 40 & -30 \\ 30 & -50 \end{vmatrix}}{-2000 + 900} = \frac{-150 + 390}{-2000 + 900} = -0,22 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 40 & 3 \\ 30 & 13 \\ 40 & -30 \\ 30 & -50 \end{vmatrix}}{-2000 + 900} = \frac{520 - 90}{-2000 + 900} = -0,39 \text{ A}$$

Poiché i valori delle correnti di maglia sono negativi, le correnti I_1 e I_2 hanno verso opposto a quello fissato.



Le correnti nei rami AB e BD non sono altro che I_1 e I_2 .

Applichiamo il 1° principio di Kirchhoff al nodo B per determinare la corrente I_3 nel ramo BC:

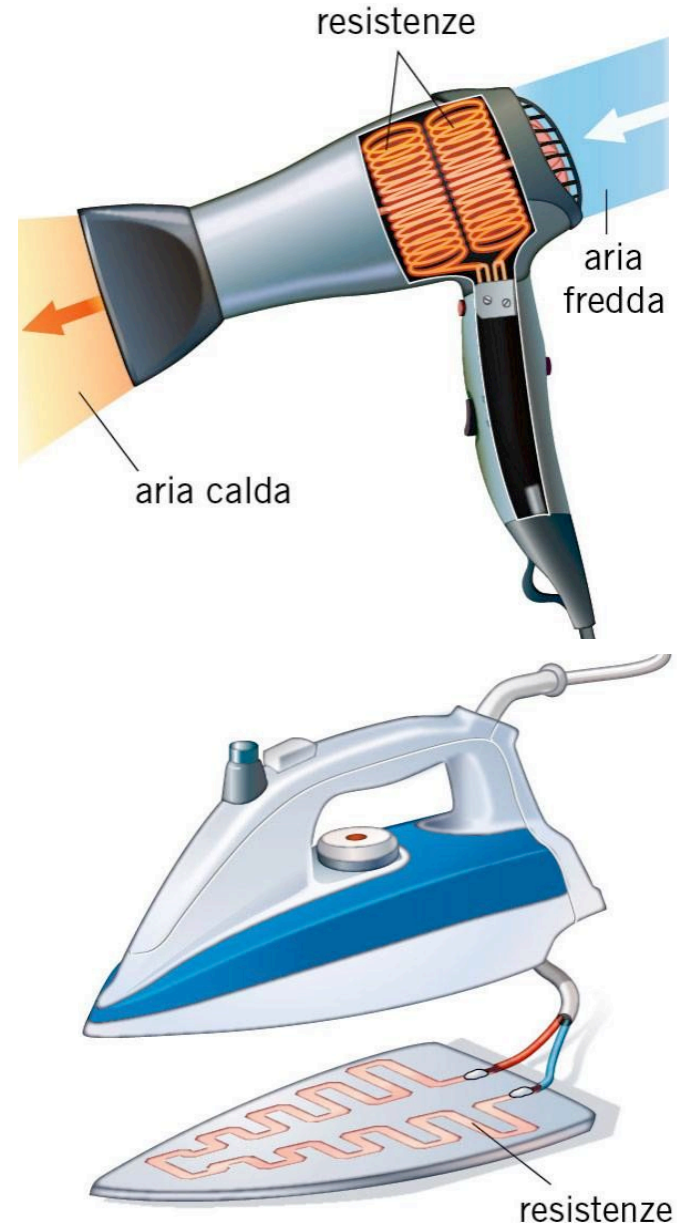
$$\sum I_{\text{entranti}} = \sum I_{\text{uscenti}} \Rightarrow I_2 = I_1 + I_3 \Rightarrow I_3 = I_2 - I_1 = 0,17 \text{ A}$$

ENERGIA E POTENZA ELETTRICA

Esistono diversi elettrodomestici (asciugacapelli, ferro da stiro, stufa, scaldabagno) che, una volta collegati alla presa della corrente, si riscaldano.

Mentre passa la corrente elettrica, l'energia potenziale elettrica si trasforma in energia termica (calore).

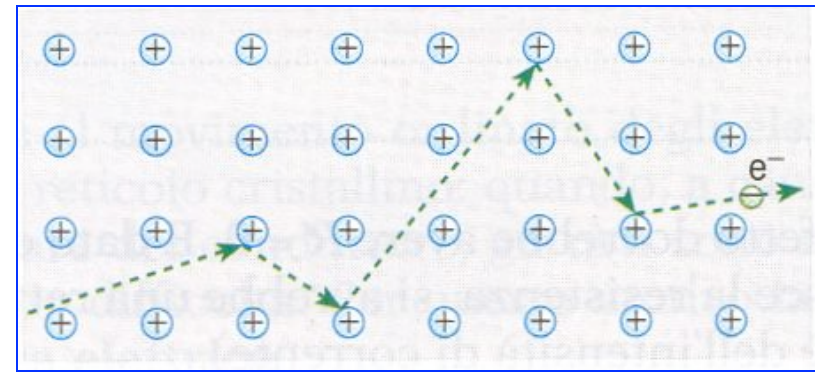
La trasformazione di energia elettrica in calore si chiama **Effetto Joule**.



Qual è la ragione fisica di questa trasformazione?

SPIEGAZIONE – Nel generatore gli elettroni acquistano energia potenziale.

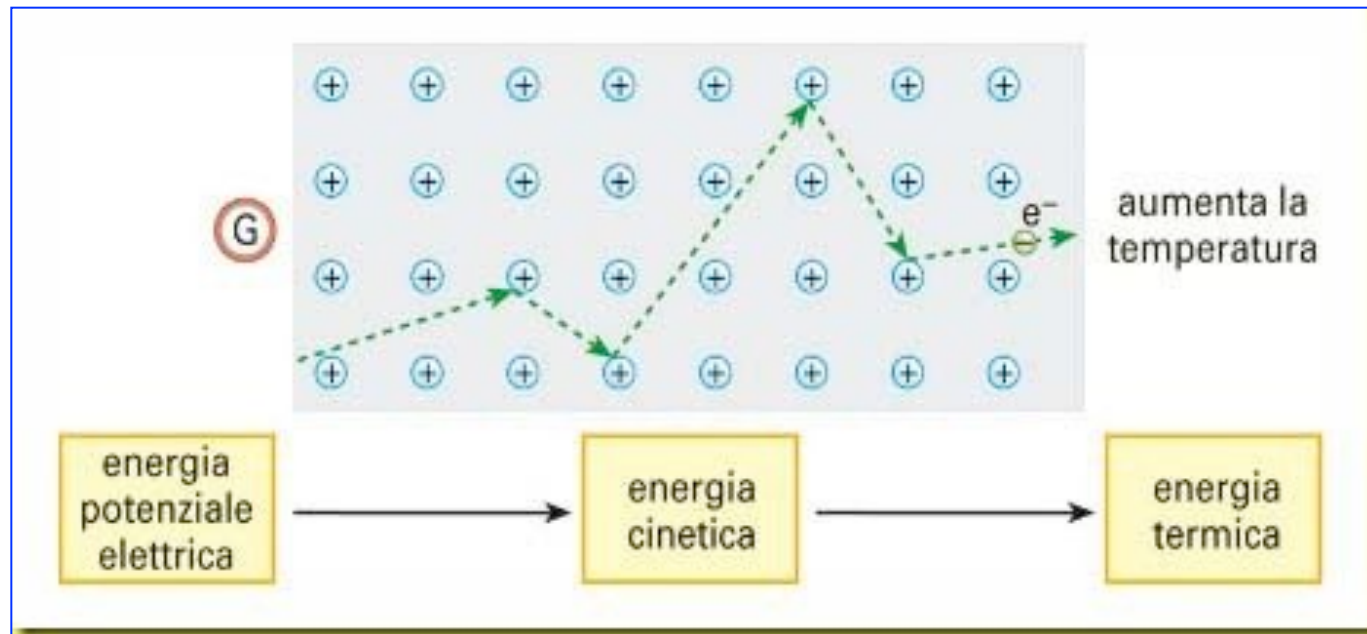
Nel circuito elettrico, a causa del campo elettrico, si mettono in movimento, per cui la loro energia potenziale inizia a trasformarsi in energia cinetica.



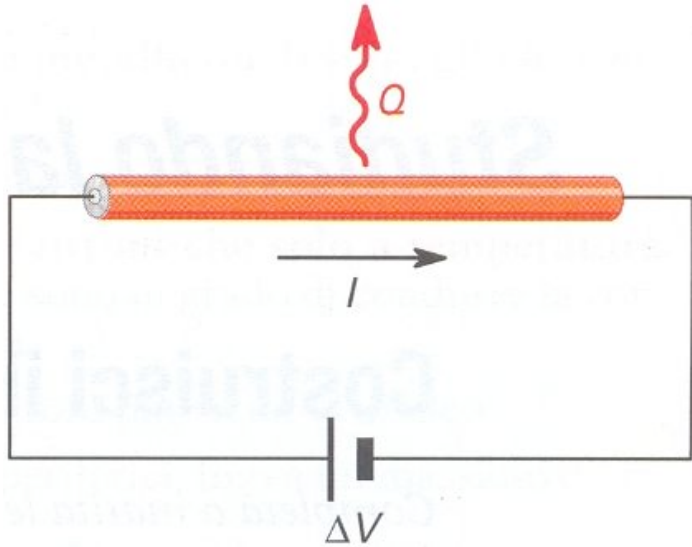
Considerata la struttura del conduttore, dopo un percorso più o meno breve essi urtano contro gli ioni del reticolo cristallino, i quali accrescono così la loro energia di oscillazione a scapito di quella degli elettroni.

Gli elettroni, la cui velocità dopo l'urto è diminuita, vengono nuovamente accelerati dal campo elettrico: il processo si ripete.

Tali eventi, che a livello microscopico provocano un aumento dell'energia cinetica media di oscillazione degli ioni del reticolo, equivalgono a livello macroscopico a un innalzamento della temperatura del conduttore.



Cerchiamo di quantificare le conseguenze dell'effetto Joule.



In base al principio di conservazione dell' energia, tutta l'energia termica Q (calore) dissipata deve essere uguale al lavoro L compiuto dal campo elettrico per spostare la carica q da un estremo all'altro del conduttore, tra i quali si ha la ΔV :

$$Q = L$$

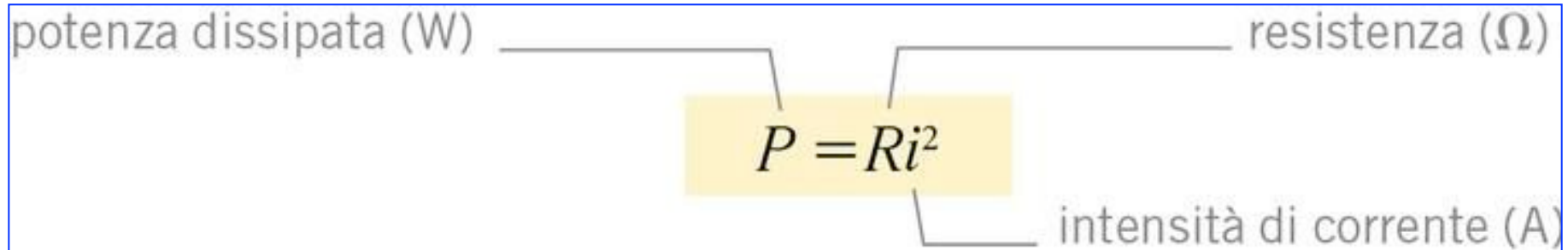
La potenza $P=Q/\Delta t$ dissipata per effetto Joule coincide con la definizione della potenza $P=L/\Delta t$.

Ricorrendo alla definizione di ddp, a quella di intensità di corrente elettrica, e alla 1ª legge di Ohm, si ottiene:

$$\Delta V = \frac{L}{q} \quad I = \frac{q}{\Delta t} \quad \Delta V = R \cdot I \Rightarrow P = \frac{L}{\Delta t} = \frac{\Delta V \cdot q}{\frac{q}{I}} = \Delta V \cdot I = R \cdot I^2$$

Effetto Joule

La potenza dissipata per effetto Joule è la rapidità con cui l'energia elettrica è trasformata in energia termica.



potenza dissipata (W) ————— resistenza (Ω)

$P = Ri^2$

————— intensità di corrente (A)

Di conseguenza:

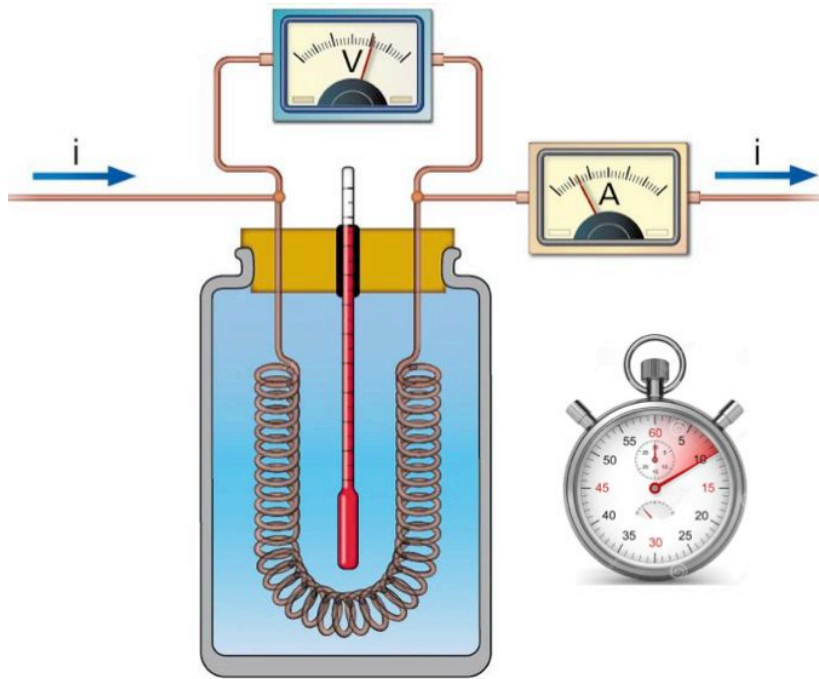
L'energia dissipata per effetto Joule è data da:

$$Q = RI^2\Delta t$$

POTENZA EROGATA DAL
GENERATORE

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

Dal momento che la potenza dissipata deve essere resa disponibile dal generatore per garantire il passaggio della corrente, ne segue che:



Grazie a questo esperimento, Joule dimostrò che anche nei fenomeni termici, che coinvolgono correnti, l'energia si conserva.

Joule verificò sperimentalmente che l'energia dissipata dalla corrente per effetto Joule:

$$W = P\Delta t = Ri^2\Delta t$$

è uguale all'energia assorbita dall'acqua:

$$W = mc\Delta T$$

L'esperimento conferma
che anche per i
fenomeni elettrici vale il
principio di
conservazione
dell'energia totale

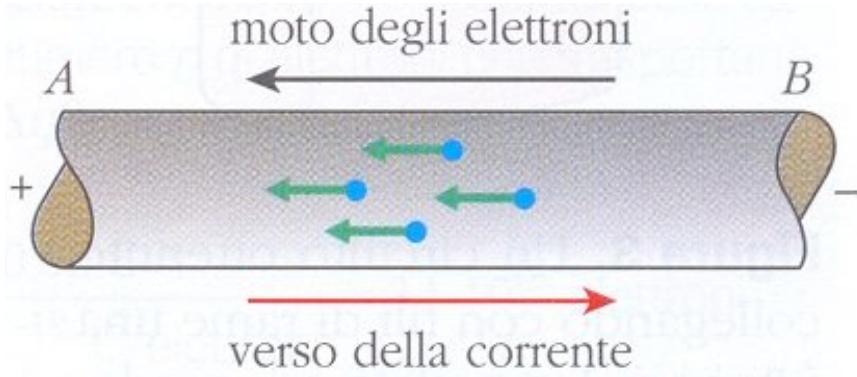
Tutta l'energia elettrica
spesa dal generatore di
tensione per far fluire la
corrente elettrica si ritrova
come aumento di energia
interna dell'acqua.

I consumi di energia elettrica sono espressi in kilowattora
(kWh) e non in Joule

Un kilowattora è l'energia
assorbita in un'ora da un
dispositivo che dissipa la
potenza di 1kW.

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

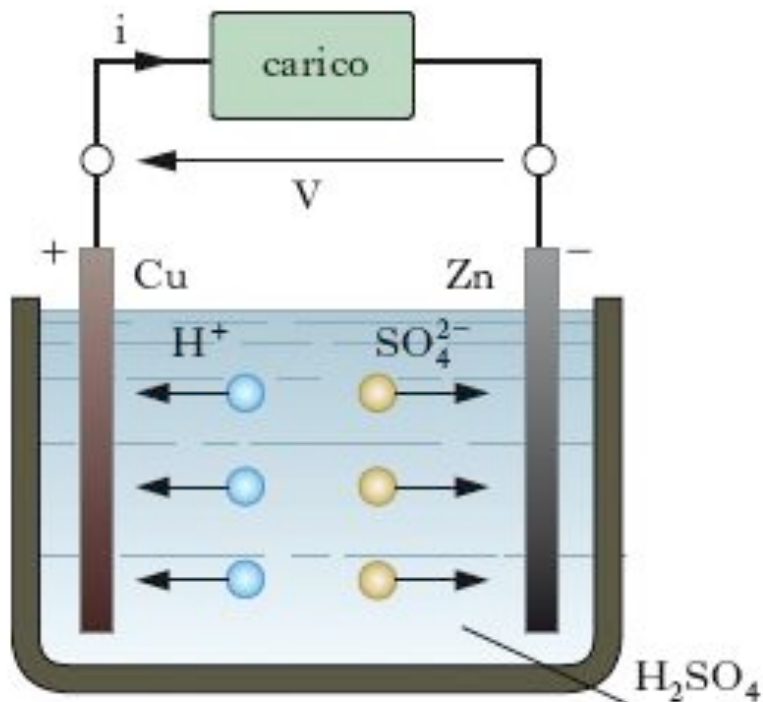
LA FORZA ELETTRIMOTRICE



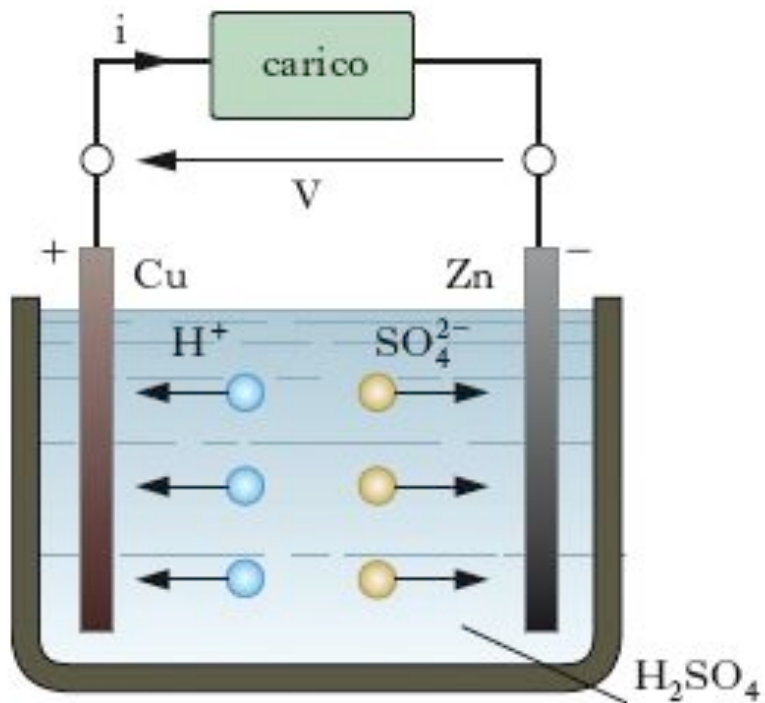
Affinché una corrente scorra stabilmente lungo un conduttore, è necessario mantenere una differenza di potenziale fra gli estremi del conduttore.

Il flusso degli elettroni nel filo metallico tende a diminuire il potenziale dell'estremo A e aumentare il potenziale dell'estremo B; quindi tende ad annullare la differenza di potenziale e, conseguentemente, anche l'intensità di corrente.

Per mantenere costante nel tempo il flusso degli elettroni, è necessario ripristinare in ogni istante la differenza di potenziale iniziale. Tale scopo si raggiunge con un **generatore di tensione**.



Ogni generatore di tensione è formato da due elettrodi, immersi in una soluzione elettrolitica. Dei due elettrodi, in seguito a reazioni chimiche, uno si carica positivamente e prende il nome di *polo positivo* (+) mentre l'altro si carica negativamente e prende il nome di *polo negativo* (-).



SPIEGAZIONE – L'elettrodo di zinco manda in soluzione ioni Zn^{++} , caricandosi negativamente grazie agli elettroni liberati dagli atomi di zinco ([reazione di ossidazione](#)):



Contemporaneamente gli ioni idrogeno H^{+} presenti nella soluzione elettrolitica sottraggono ognuno un elettrone all'elettrodo di rame, che in tal modo si carica positivamente ([reazione di riduzione](#)):



Se indichiamo con W il lavoro che il generatore compie, contro le forze del campo elettrico, per spostare una carica positiva dal polo negativo a quello positivo, possiamo caratterizzare un generatore attraverso la seguente grandezza:

FORZA ELETTRICOMOTRICE

La forza elettromotrice (f_{em}), di un generatore è il rapporto fra il lavoro W che esso compie per spostare una carica q al suo interno e la carica stessa:

forza elettromotrice (V) ————— lavoro (J)

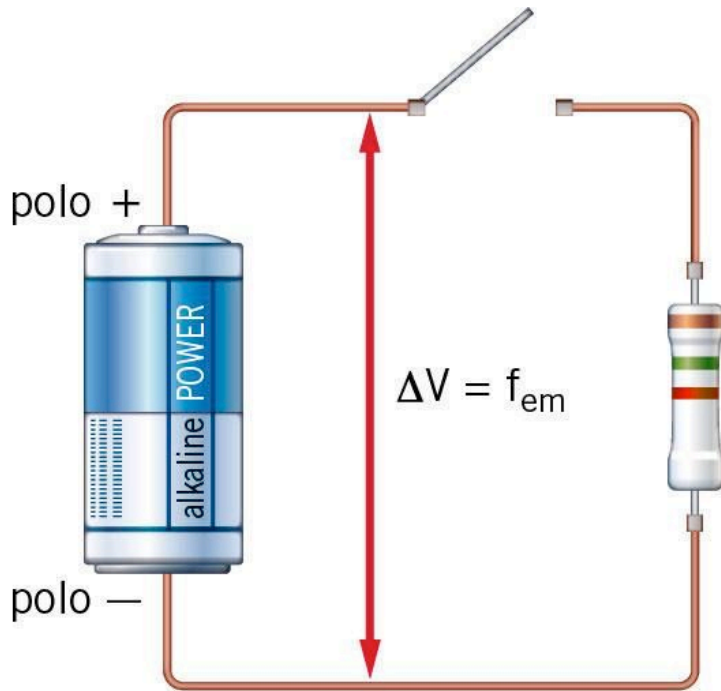
$$f_{em} = \frac{W}{q}$$

————— carica elettrica (C)

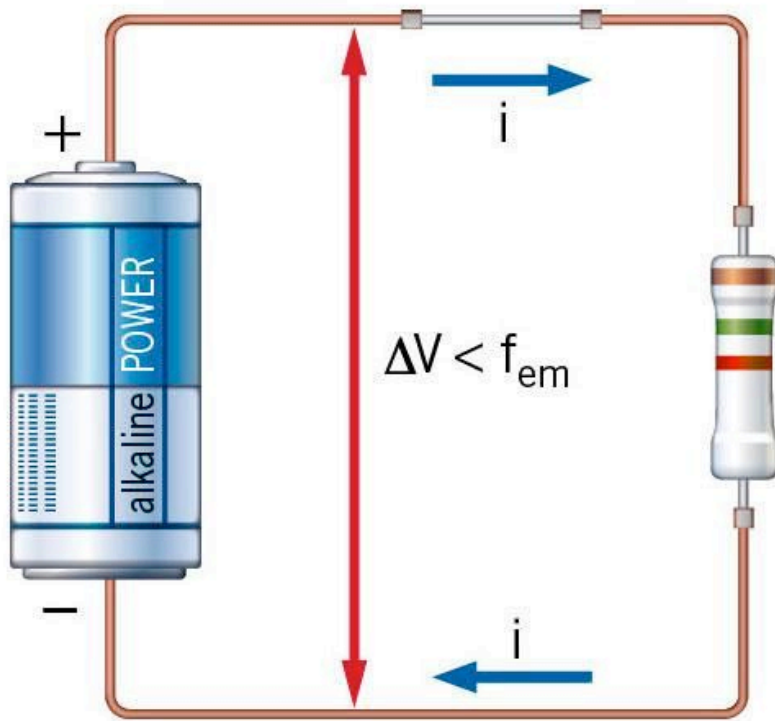
The diagram shows the formula $f_{em} = \frac{W}{q}$ inside a yellow box. A line from the label 'forza elettromotrice (V)' points to the symbol f_{em} . A line from the label 'lavoro (J)' points to the numerator W . A line from the label 'carica elettrica (C)' points to the denominator q .

Nei circuiti elettrici fin qui trattati, abbiamo considerato generatori ideali, ossia generatori in cui la fem è uguale alla ddp ai loro estremi.

Ma per i generatori reali le cose stanno in maniera diversa.



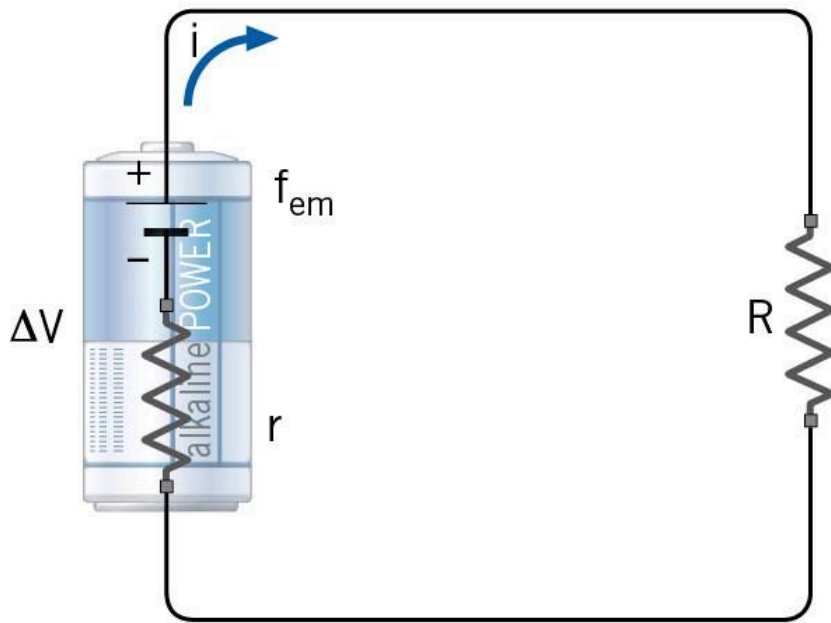
La situazione $\Delta V = f_{em}$ si ha soltanto a circuito aperto (quando non circola corrente).



A circuito chiuso (quando circola corrente) si ha invece $\Delta V < \mathcal{E}_{em}$

Questo significa che il generatore reale presenta una resistenza interna che provoca una caduta di tensione.

La **resistenza interna** è una misura dell'impedimento al moto delle cariche che si ha all'interno del generatore.



Pertanto, un **generatore reale di tensione** è rappresentato da un generatore ideale di tensione in serie a una resistenza interna.

Se applichiamo al circuito il 2° principio di Kirchhoff si ottiene:

$$f_{em} = (R + r)i \Rightarrow i = \frac{f_{em}}{R + r}$$

Poiché: $\Delta V = Ri$

allora:

$$\Delta V = \frac{R}{R + r} f_{em} \Rightarrow \Delta V < f_{em}$$