FISICA II

Lez. 7 – Resistenza

Prof. Giovanni Mettivier

Prof. Giovanni Mettivier, PhD

Dipartimento Scienze Fisiche
Università di Napoli “Federico II”
Compl. Univ. Monte S.Angelo
Via Cintia, I-80126, Napoli
mettivier@na.infn.it
+39-081-676137

Obiettivi di apprendimento

- Capire il funzionamento di una sorgente di *f.e.m*. in termini di lavoro compiuto.
- Applicare la relazione tra la *f.e.m.*, la corrente e la potenza per una batteria ideale.
- Applicare la legge delle maglie per scrivere l'equazione della maglia che lega le differenze di potenziale degli elementi circuitali lungo tutta la maglia.
- Applicare la regola della resistenza nel passaggio attraverso un resistore.
- Applicare la regola della *f.e.m*. nel passaggio attraverso una sorgente di *f.e.m.*
- Capire che le resistenze in serie sono percorse tutte dalla stessa corrente, uguale a quella che percorrerebbe la loro resistenza equivalente.
- Calcolare la resistenza equivalente per resistore in serie.
- Capire che la differenza di potenziale ai capi di una serie di resistori e pari alla somma delle differenze di potenziale ai capi di ciascuno di essi.
- Distinguere tra una batteria reale e una batteria ideale e sostituire in uno schema elettrico una batteria reale con una ideale e una resistenza esterna.
- Calcolare, per una batteria reale inserita in un circuito, la differenza di potenziale ai suoi morsetti per una corrente che scorre nel verso della *f.e.m.* è una che scorre nel senso contrario.

La maggior parte dei circuiti analizzati soddisfa la condizione di ***regime stazionario*** cioè l’intensità ed il verso delle correnti nei circuiti sono costanti nel tempo. Una corrente che mantiene costante la sua direzione viene detta ***corrente continua***.

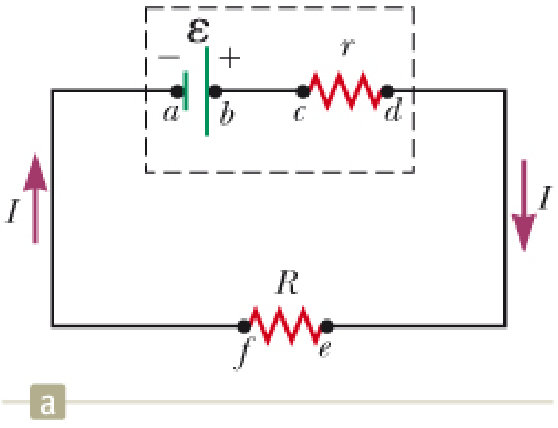
Poiché, in un dato circuito, la differenza di potenziale ai terminali di una batteria rimane costante, anche la corrente nel circuito rimane costante sia in intensità che in direzione e per questa ragione si usa per definirla il termine ***corrente continua***. Una batteria è anche chiamata ***sorgente di forza elettromotrice (f.e.m.).***

Forza elettromotrice

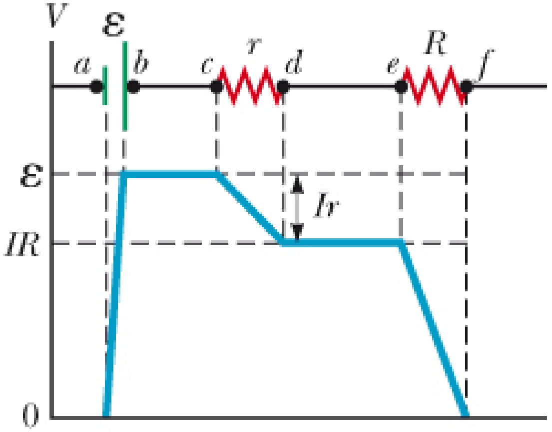
La f.e.m ε di una batteria è la massima differenza di potenziale possibile che la batteria può erogare ai suoi terminali. Si può pensare alla sorgente di f.e.m. come ad una ‘pompa per cariche’.

Poiché una batteria è fatta di materia, il mezzo interno alla batteria offre resistenza al passaggio delle cariche. Questa resistenza è chiamata **resistenza interna *r***. Una batteria ideale ha resistenza interna nulla e la differenza di potenziale ai morsetti della batteria (detta ***tensione ai morsetti***) è sempre uguale alla *f.e.m*.

La tensione ai morsetti della batteria $\Delta V = V_d - V_a$ è



$$\Delta V = \varepsilon - Ir$$



Da questa espressione risulta che ε è equivalente alla tensione ai morsetti a circuito aperto oppure alla **differenza di potenziale a circuito aperto**, cioè la tensione ai morsetti della batteria quando la corrente è nulla. La *f.e.m*. è il valore che viene riportato sull’etichetta della batteria.

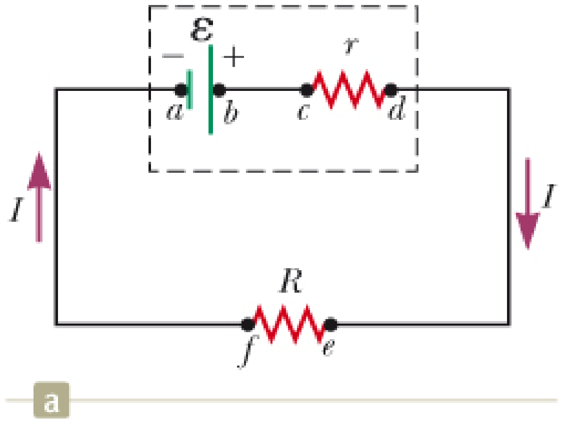
Si osserva che la tensione ΔV deve essere uguale anche alla tensione ai capi della resistenza esterna *R*, chiamata generalmente **resistenza di carico.**

Forza elettromotrice

La differenza di potenziale ai capi della resistenza di carico è $\Delta V = IR$. Sostituendo si ha

$$\varepsilon = IR + Ir$$

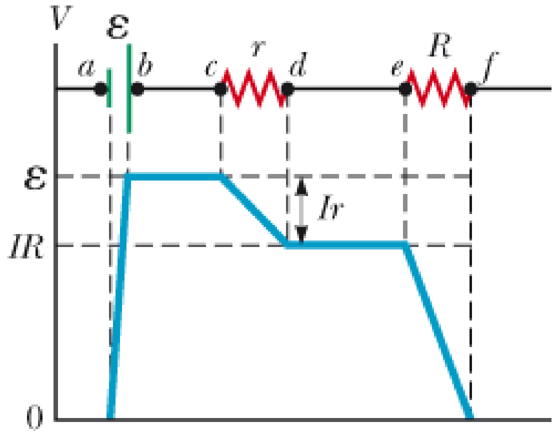
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$



La corrente dipende sia dalla resistenza di carico esterna R sia dalla resistenza interna r della batteria. Se R è molto maggiore di r, come accade nella maggior parte dei circuiti reali, possiamo trascurare r.

Moltiplicando entrambi i membri per I, otteniamo

$$I\varepsilon = I^2R + I^2r$$



Poiché la potenza è $P = I\Delta V$, la potenza totale $I\varepsilon$ associata alla *f.e.m.* della batteria è la somma di quella fornita al carico resistivo interno, I^2R, e di quella fornita alla resistenza interna, I^2r.

Esercizio

Una batteria è caratterizzata da una *f.e.m*. di 120V ed ha una resistenza di 0.050 Ω. I suoi morsetti sono connessi ad una resistenza di carico di 3.00 Ω.

a) Si determinino la corrente nel circuito e la tensione ai morsetti della batteria

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{12.0\ V}{3.00\ \Omega + 0.05\ \Omega} = 3.03\ A$$

$$\Delta V = \varepsilon - Ir = 12\ V - (3.93\ A)(0.050\ \Omega) = 11.8\ V$$

$$\Delta V = IR = (3.93\ A)(3.00\ \Omega) = 11.8\ V$$

b) Si calcolino la potenza fornita alla resistenza di carico, quella fornita alla resistenza interna della batteria e la potenza fornita dalla batteria.

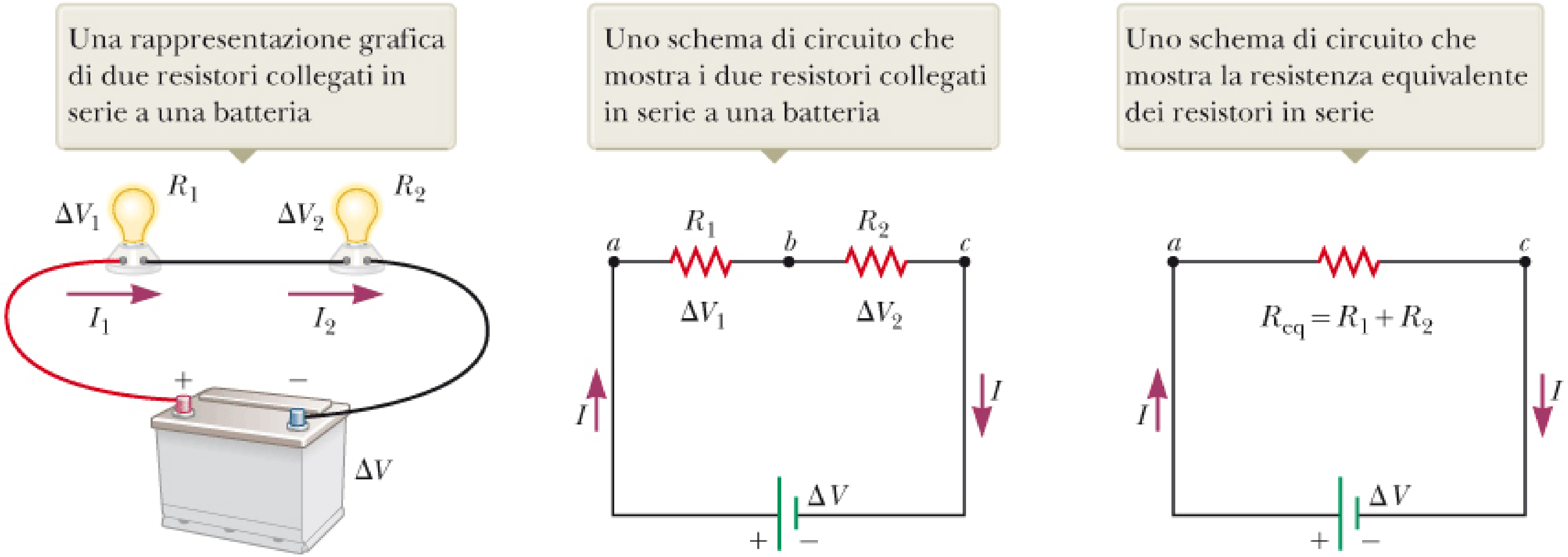
$$P_R = I^2 R = (3.93\ A)^2 (3.00\ \Omega) = 46.3\ W$$

$$P_r = I^2 r = (3.93\ A)^2 (0.05\ \Omega) = 0.772\ W$$

$$P = P_R + P_r = 46.3\ W + 0.772\ W = 47.1\ W$$

Resistori in serie

Quando due o più resistori sono collegati insieme in modo che abbiamo un solo estremo in comune per ogni coppia, si dice che sono **collegati in serie**. E’ importante notare che la carica *Q* che passa nei due resistori è la stessa poiché la carica che fluisce attraverso R_1 deve essere uguale a quella che fluisce attraverso R_2. Se così non fosse, ci dovrebbe essere un accumulo di carica nei fili che collegano i resistori.



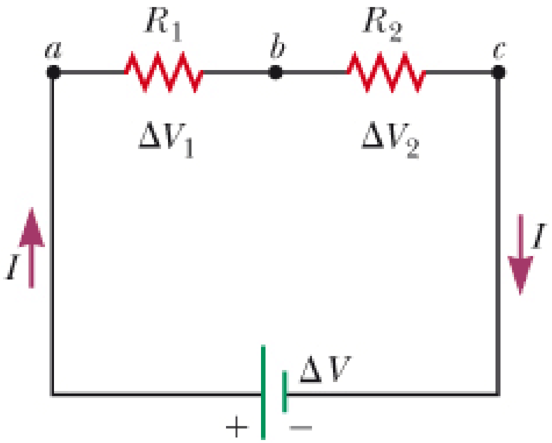
Poiché la stessa quantità di carica passa attraverso entrambi i resistori in un dato intervallo di tempo, anche la corrente è la stessa in entrambi i resistori. Poiché la differenza di potenziale tra *a* e *b* nel diagramma circuitale di fig. è uguale a IR_1 e la differenza di potenziale tra *b* e *c* è IR_2, la differenza di potenziale tra *a* e *c* è data da:

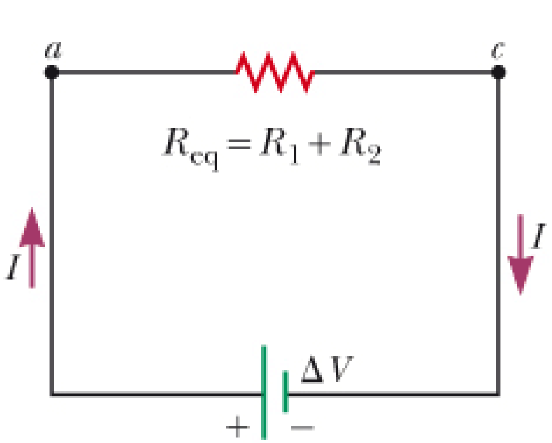
$$\Delta V = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

Quindi, la differenza di potenziale ai capi della batteria è applicata pure alla **resistenza equivalente** in fig. :

$$\Delta V = IR_{eq}$$

dove abbiamo indicato che la resistenza equivalente ha lo stesso effetto sul circuito poiché risulta la stessa corrente nella batteria di quella del collegamento dei resistori.





Resistori in serie

Mettendo insieme queste equazioni, vediamo che possiamo sostituire i due resistori in serie con una sola resistenza equivalente il cui valore è la *somma* delle singole resistenze:

$$\Delta V = IR_{eq} = I(R_1+R_2) \text{ -> } R_{eq} = R_1 + R_2$$

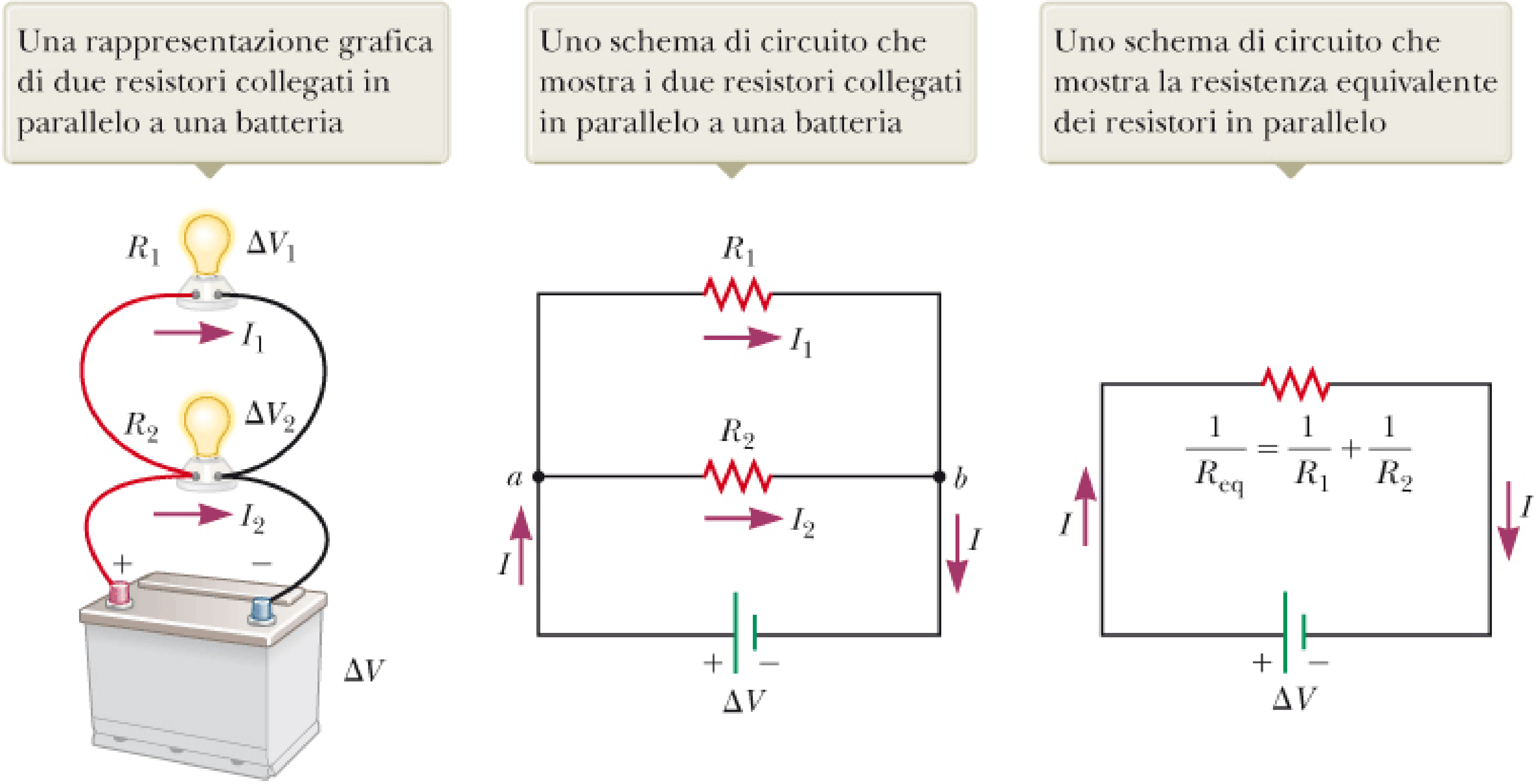
la resistenza equivalente di tre o più resistori collegati in serie è semplicemente:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Quindi, **la resistenza equivalente di un insieme di resistori collegati in serie è uguale alla somma algebrica delle singole resistenze ed è sempre maggiore di ciascuna di esse.**

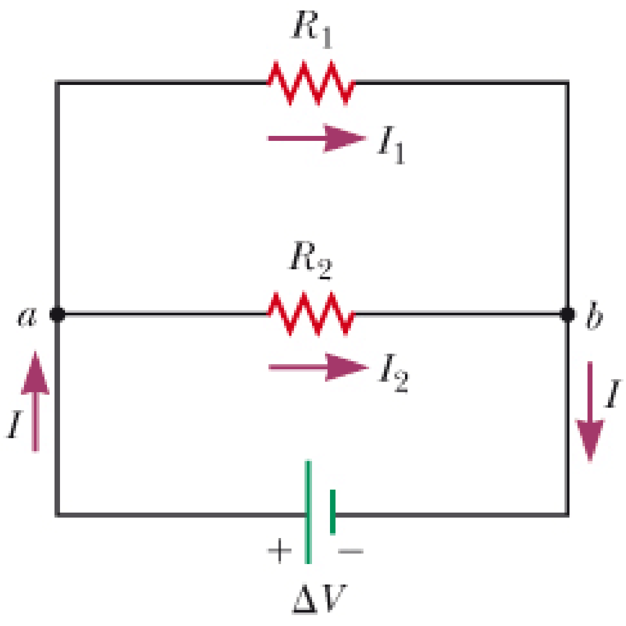
Resistori in paralleo

Consideriamo ora due resistori **collegati in parallelo**. In questo caso la differenza di potenziale ai capi dei resistori è la stessa poiché ciascun resistore è collegato direttamente ai capi della batteria. Invece, la corrente in ciascun resistore è generalmente diversa.



Resistori in paralleo

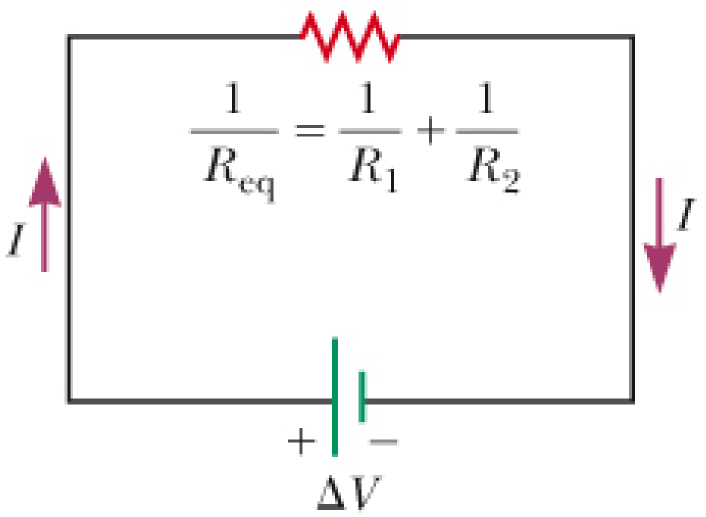
Quando le cariche arrivano al punto *a* (chiamato ***nodo***) nel diagramma circuitale di fig., la corrente si divide in due parti, I_1 che passa attraverso R_1 e I_2 cha passa attraverso R_2. Se R_1 è maggiore di R_2, I_1 sarà minore di I_2. Naturalmente, per la legge di conservazione della carica, la corrente I che entra nel punto *a* deve essere uguale alla corrente totale che esce dal punto *a*:



$$I = I_1 + I_2$$

Poiché la differenza di potenziale ai capi di ogni resistore deve essere la stessa, dalla legge $I = \Delta V/R$ si ottiene:

$$I = I_1 + I_2 = \Delta V/R_1 + \Delta V/R_2 = \Delta V(1/R_1 + 1/R_2) = \Delta V/R_{eq}$$



dove R_{eq} è una singola resistenza equivalente che ha lo stesso effetto sul circuito; cioè essa fa sì che vi sia la stessa corrente nella batteria.

Da questo risultato si vede che la resistenza equivalente di due resistori in parallelo è data da:

$$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$$

Estendendo questa analisi a tre o più resistori in parallelo si ottiene la seguente espressione generale:

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

Da questa espressione si può vedere che **il reciproco della resistenza equivalente di due o più resistori collegati in parallelo è uguale alla somma algebrica dei reciproci delle singole resistenze, e la resistenza equivalente è sempre minore della più piccola resistenza dell’insieme.**

Un circuito costituito da resistori può spesso essere ridotto a un circuito semplice contenente un solo resistore. Per ottenere ciò, bisogna esaminare il circuito iniziale e sostituire ogni resistore in serie o in parallelo con le resistenze equivalenti.

Successivamente si può disegnare uno schema del nuovo circuito dopo aver fatto queste variazioni. Esaminando il nuovo circuito e sostituendo ogni nuovo collegamento in serie o in parallelo si arriva, eventualmente, ad avere una sola resistenza per l'intero circuito.

Esercizio

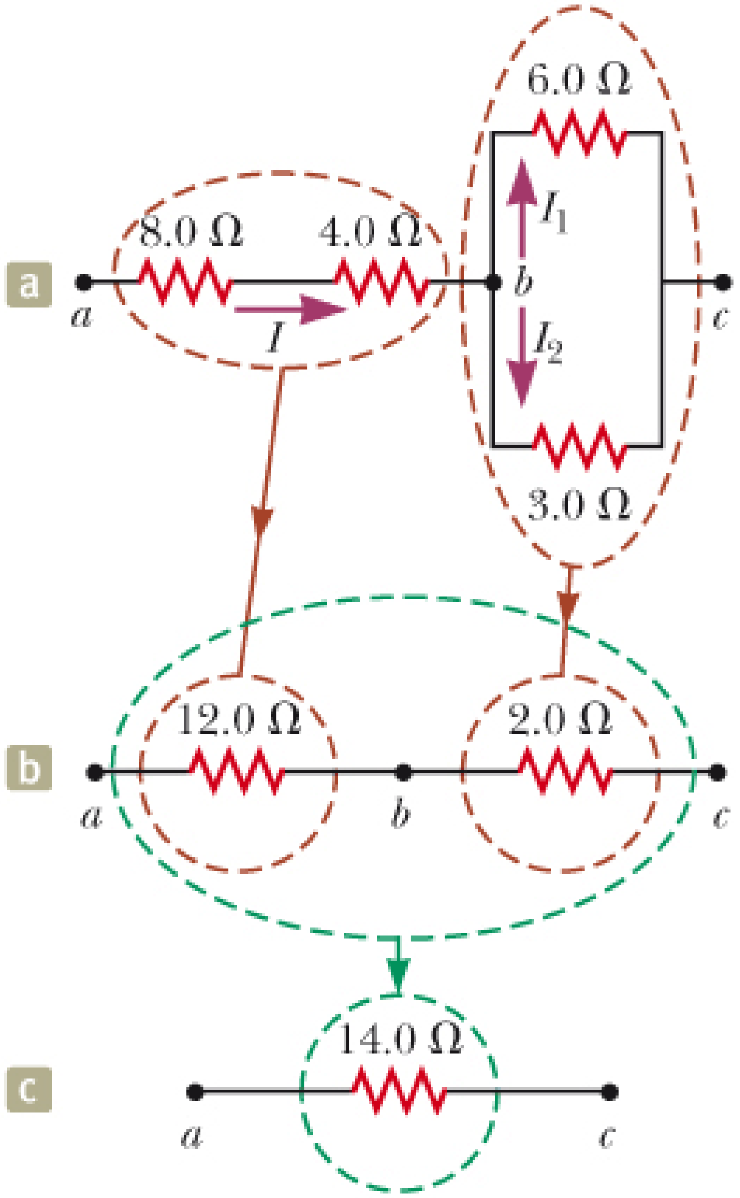
Quattro resistori sono collegati come in fig.
a) Trovare la resistenza equivalente tra a e c.

$$R_{eq} = 8\,\Omega + 4\,\Omega = 12\,\Omega$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{6\,\Omega} + \frac{1}{3\,\Omega} = \frac{3}{6\,\Omega}$$

$$R_{eq} = \frac{6\,\Omega}{3} = 2\,\Omega$$

$$R_{eq} = 12\,\Omega + 2\,\Omega = 14\,\Omega$$



b) Qual è la corrente che passa in ciascun resistore se viene mantenuta una differenza di potenziale di 42V tra a e c.

$$I = \frac{\Delta V_{ac}}{R_{eq}} = \frac{42V}{14\Omega} = 3A$$

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \rightarrow (6\,\Omega)I_1 = (3\,\Omega)I_2 \rightarrow I_2 = 2I_1$$

$$I_1 + I_2 = 3\,A \;\rightarrow\; I_1 + 2I_2 = 3\,A \;\rightarrow I_1 = 1\,A$$

$$I_2 = 2I_1 = 2(1\,A) = 2\,A$$

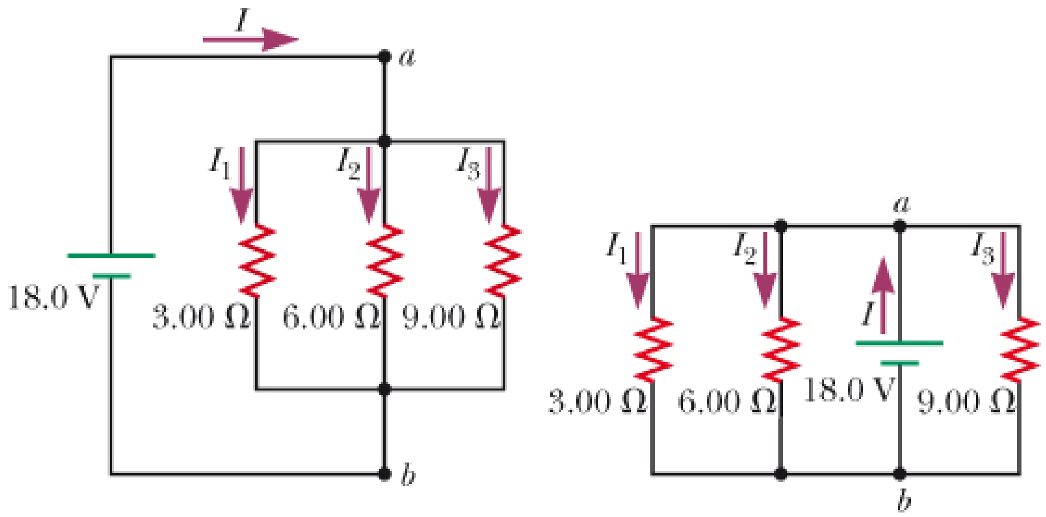
Esercizio

Tre resistori, come in figura, sono collegati in parallelo. Tra i punti *a* e *b* viene applicata una differenza di potenziale di 18.0 V.

a) Si determini la resistenza equivalente del circuito.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3\,\Omega} + \frac{1}{6\,\Omega} + \frac{1}{9\,\Omega} = \frac{11}{18\,\Omega}$$

$$R_{eq} = \frac{18\,\Omega}{11} = 1.64\,\Omega$$



b) Si trovi la corrente in ogni resistore

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{18\,V}{3\,\Omega} = 6\,A \qquad I_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{18\,V}{6\,\Omega} = 3\,A \qquad I_3 = \frac{\Delta V}{R_3} = \frac{18\,V}{9\,\Omega} = 2\,A$$

La *f.e.m.* è rappresentata da una freccia che va dal polo negativo verso il polo positivo.

Quando una batteria è scollegata dal circuito la sua energia chimica non provoca alcun flusso di cariche al suo interno. Quando invece è collegata al circuito, le reazioni chimiche provocano un flusso netto di portatori di carica positivi dal polo negativo a quello positivo, nella direzione indicata dalla freccia rossa. Questo flusso costituisce la corrente instaurata nel circuito nella medesima direzione.

Nel generatore di *f.e.m.* i portatori di carica positivi si muovono da una regione di basso potenziale elettrico, e quindi di bassa energia potenziale elettrica (polo negativo), a una regione a maggior potenziale elettrico, e quindi più alta energia potenziale (polo positivo).

Legge di Kirchhoff

Il procedimento per analizzare circuiti complessi è enormemente semplificato con l'uso di due semplici regole dette **leggi di Kirchhof**:

1. **Legge dei nodi.** Ad ogni nodo la somma delle correnti deve essere uguale a zero:

$$\sum_{nodo} I = 0$$

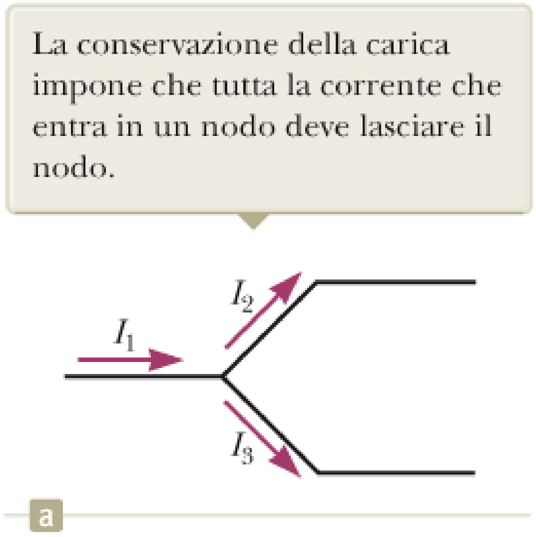
1. **Legge delle maglie**. La somma delle differenze di potenziale ai capi degli elementi che costituiscono una maglia deve essere uguale a zero

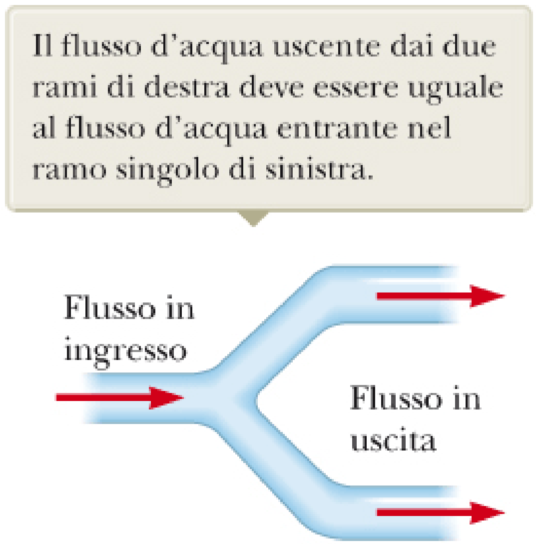
$$\sum_{sulla\,maglia} \Delta V = 0$$

Legge di Kirchhoff

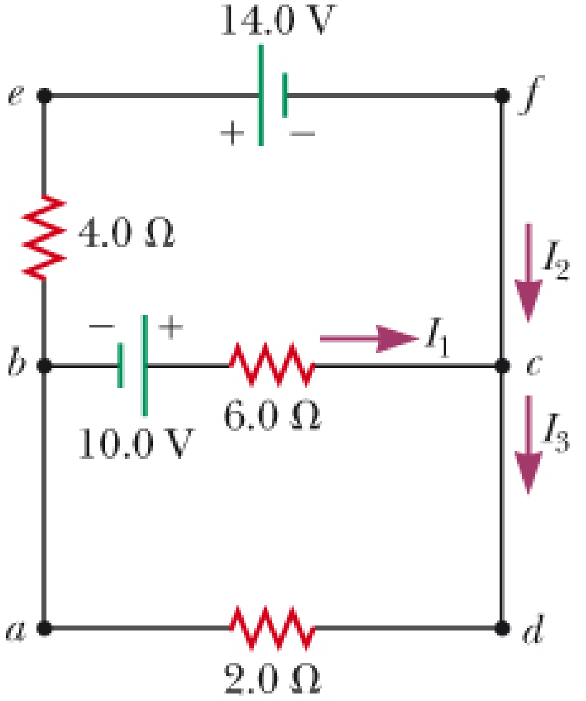
La legge dei nodi è una conseguenza della **conservazione della carica**. Qualsiasi corrente entri in un dato punto di un circuito deve poi lasciare quel punto, poiché la carica non può nascere o scomparire in un punto. Le correnti entranti in un nodo vengono considerate positive $+I$, mentre le correnti uscenti dai nodi vengono considerate negative $-I$. Se applichiamo questa legge al nodo mostrato in fig., si ottiene:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$





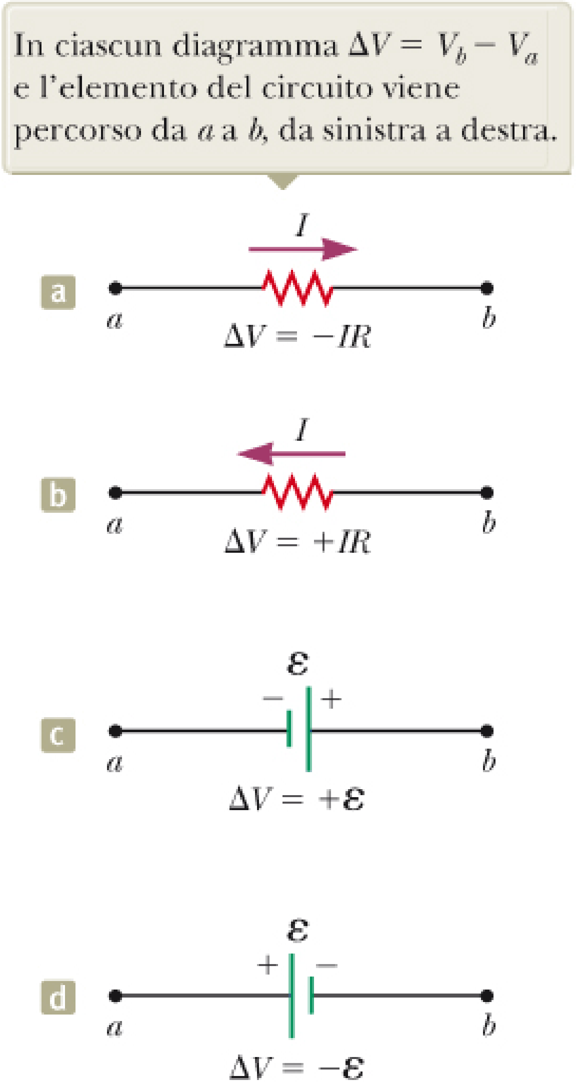
Le leggi di Kirchhoff generalmente sono usate per determinare la corrente in ciascun elemento di un circuito. Usando queste leggi, per prima cosa disegniamo il circuito e assumiamo un verso per la corrente in ciascun dispositivo del circuito. Disegniamo una freccia per rappresentare questo verso dopo il dispositivo e assegniamo un simbolo per ciascuna corrente indipendente, come I_1 e I_2 e così via. La fig. mostra tre diverse correnti che esistono nel circuito. Si tenga a mente che le correnti nei dispositivi collegati in serie sono le stesse, cosicché alle correnti in questi dispositivi sarà assegnato lo stesso simbolo.



La seconda legge consegue dalla **conservazione dell’energia**. Supponiamo che una carica si muova in un qualsiasi percorso chiuso in un circuito (la carica parte ed arriva nello stesso punto). In questo caso, il circuito deve guadagnare e perdere la stessa quantità di energia. Questo è il modello di sistema isolato del circuito: nessuna energia viene trasferita all’esterno del sistema, ma le trasformazioni di energia avvengono all’interno del sistema (trascurando il trasferimento di energia per radiazione e tramite calore all’aria dagli elementi circuitali caldi). L’energia del circuito può diminuire sotto forma di caduta di potenziale quando una carica si muove attraverso un resistore $-IR$, oppure nel caso in cui essa si muova in verso opposto attraverso una sorgente di *f.e.m*. L’energia potenziale aumenta quando la carica passa attraverso una batteria dal polo negativo a quello positivo.

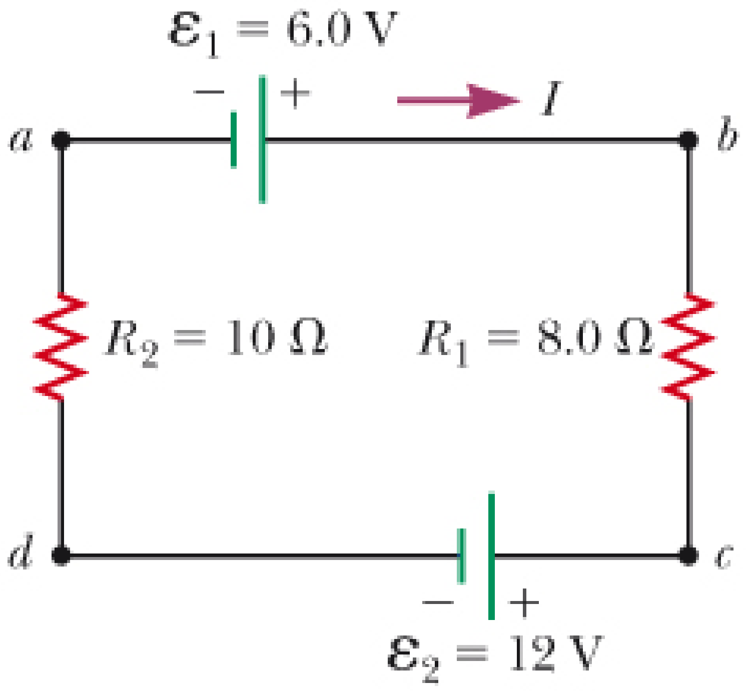
Nell'applicare la seconda legge si devono seguire le seguenti convenzioni sui segni:

- Le cariche vanno in un resistore dal punto a potenziale maggiore ad uno a potenziale minore e, se il resistore viene percorso nel verso della corrente, la differenza di potenziale ΔV ai capi del resistore è $-IR$.
- Se un resistore viene percorso nel verso *opposto* a quello della corrente, la differenza di potenziale ΔV ai capi del resistore è $+IR$.
- Se una sorgente di *f.e.m.* (la cui resistenza interna è supposta nulla) viene attraversata nello stesso verso della *f.e.m.* (dal negativo al positivo), la differenza di potenziale ΔV è $+\varepsilon$.
- Se una sorgente di *f.e.m.* (la cui resistenza interna è supposta nulla) viene attraversata in direzione opposto alla *f.e.m.* (dal positivo al negativo), la differenza di potenziale ΔV è $-\varepsilon$.



Esempio

Il circuito mostrato è costituito da un'unica maglia e contiene due resistori e due batterie. (Le resistenze interne delle batterie vengono trascurate). Si trovi la corrente che circola nel circuito.



$$\sum \Delta V = 0 \rightarrow \varepsilon_1 - IR_1 - \varepsilon_2 - IR_2 = 0$$

$$I = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{R_1 + R_2} = \frac{6\,V\ - 12\,V}{8\,\Omega + 10\,\Omega} = -0.33\,A$$

Esercizio

Si calcolino le correnti incognite I_1, I_2 e I_3 nel circuito.
In fig. i nodi sono localizzati nei punti b e c e si possono identificare tre maglie abcda e aefda e befcb.

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$abcda\colon 10\ V\ - (6\ \Omega)I_1 - (2\ \Omega)I_3 = 0$$

$$befcb\colon -(4\ \Omega)I_2 - 14\ V + (6\ \Omega)I_1 - 10\ V = 0$$

$$-24\ V + (6\ \Omega)I_1 - (4\ \Omega)I_2 = 0$$

$$10\ V\ - (6\ \Omega)I_1 - (2\ \Omega)(I_1 + I_2) = 0$$

$$10\ V\ - (8\ \Omega)I_1 - (2\ \Omega)I_2 = 0$$

$$-96\ V + (24\ \Omega)I_1 - (16\ \Omega)I_2 = 0$$

$$30\ V - (24\ \Omega)I_1 - (6\ \Omega)I_2 = 0$$

$$-66\ V - (22\ \Omega)I_2 = 0$$

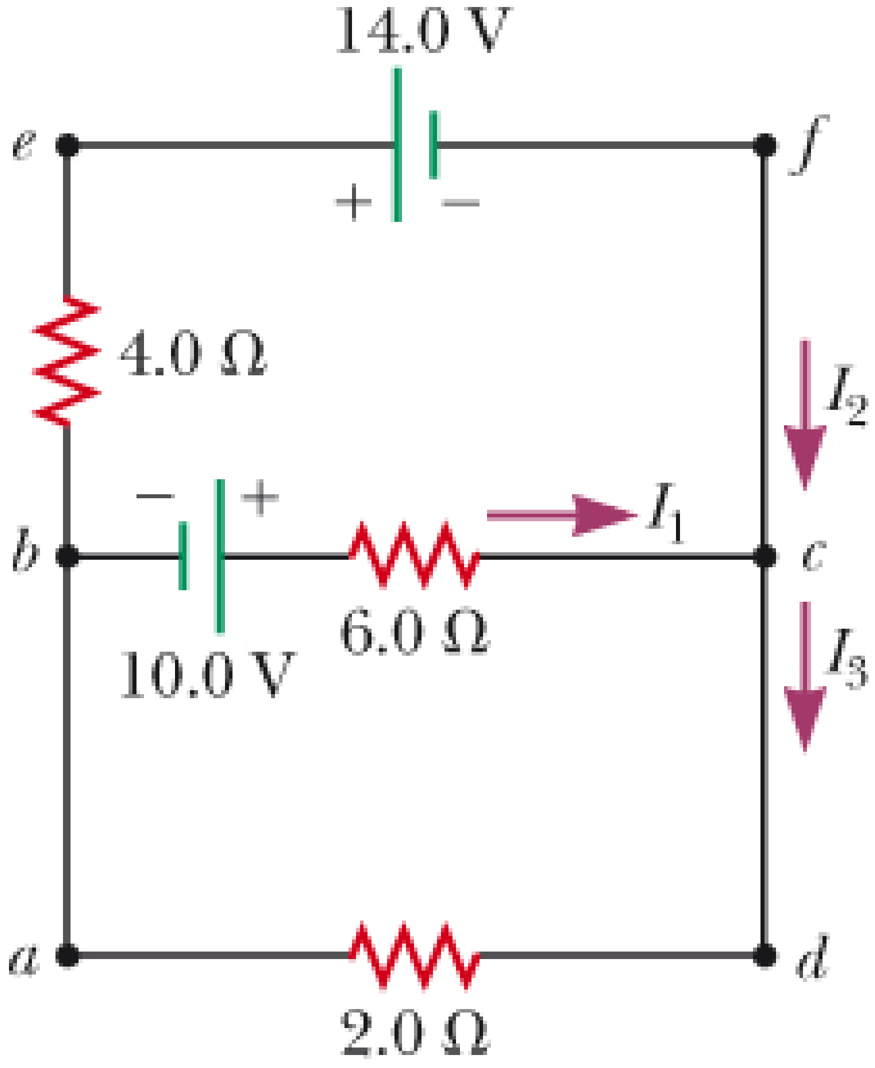
$$I_2 = -3\ A$$

$$-24\ V + (6\ \Omega)I_1 - (4\ \Omega)(-3\ A) = 0$$

$$-24\ V + (6\ \Omega)I_1 + 12\ V = 0$$

$$I_1 = 2\ A$$

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2\ A\ - 3\ A = -1\ A$$



Carica di un condensatore

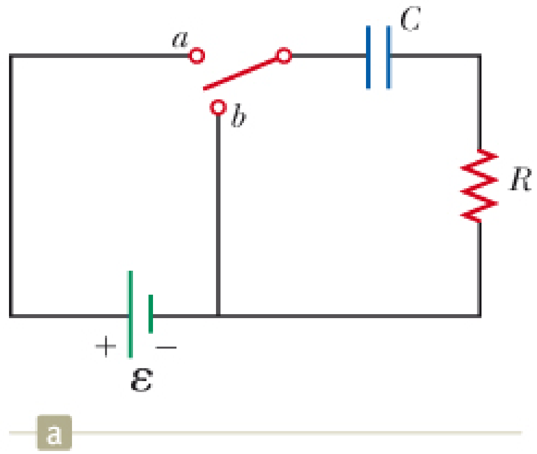
Supponiamo che il condensatore in figura sia inizialmente scarico. Quando l'interruttore è aperto non circola corrente. Se a *t=0* l'interruttore viene ruotato in posizione *a*, le cariche inizieranno a muoversi producendo una corrente nel circuito e il condensatore inizierà a caricarsi.
La carica, a causa del campo elettrico prodotto dalla batteria, è trasferita da un'armatura all'altra attraverso i fili di connessione fino a quando il condensatore sarà completamente carico. Man mano che le armature si vanno caricando, la differenza di potenziale fra esse aumenta. Al momento in cui viene raggiunto tale valore massimo, la corrente nel circuito diventa zero. Applichiamo la seconda legge di Kirchhoff al circuito dopo che l'interruttore viene ruotato in posizione *a*. Percorrendo il circuito in senso orario, si ha

$$\varepsilon - \frac{q}{C} - iR = 0$$

dove *q/C* è la differenza di potenziale ai capi del condensatore e *iR* è quella ai capi della resistenza.

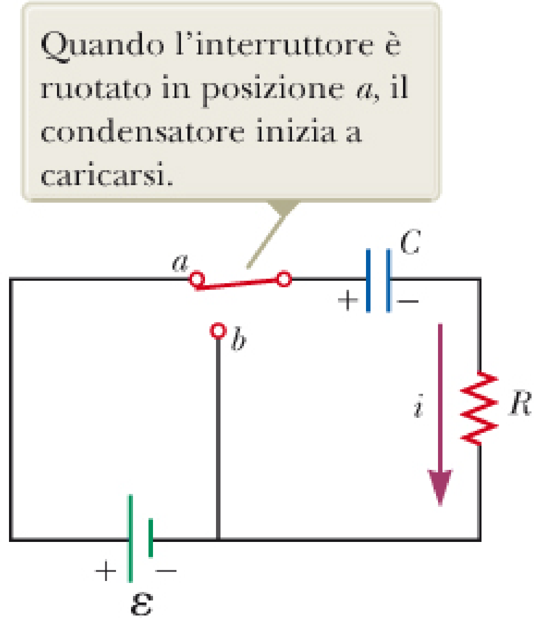
Carica di un condensatore

Notiamo che *q* e *i* sono valori *istantanei* che, durante il processo di carica del condensatore, dipendono dal tempo. Quando l'interruttore viene ruotato in posizione *a* (*t*=0), la carica sul condensatore è zero e dall'eq. si trova che la corrente iniziale *I*, nel circuito è massima ed uguale a



$$I_i = \frac{\varepsilon}{R} \quad (t = 0)$$

Alla fine, quando il condensatore è stato caricato fino al suo valore massimo Q_{max}, la carica smette di scorrere, la corrente nel circuito è zero e la differenza di potenziale della batteria è interamente ai capi del condensatore. Sostituendo *i*=0 nell'eq, si ottiene il valore della carica massima sul condensatore:



$$Q_{max} = C\varepsilon$$

Carica di un condensatore

Per determinare le espressioni analitiche che forniscono la dipendenza dal tempo della carica e della corrente, si deve risolvere l'eq.

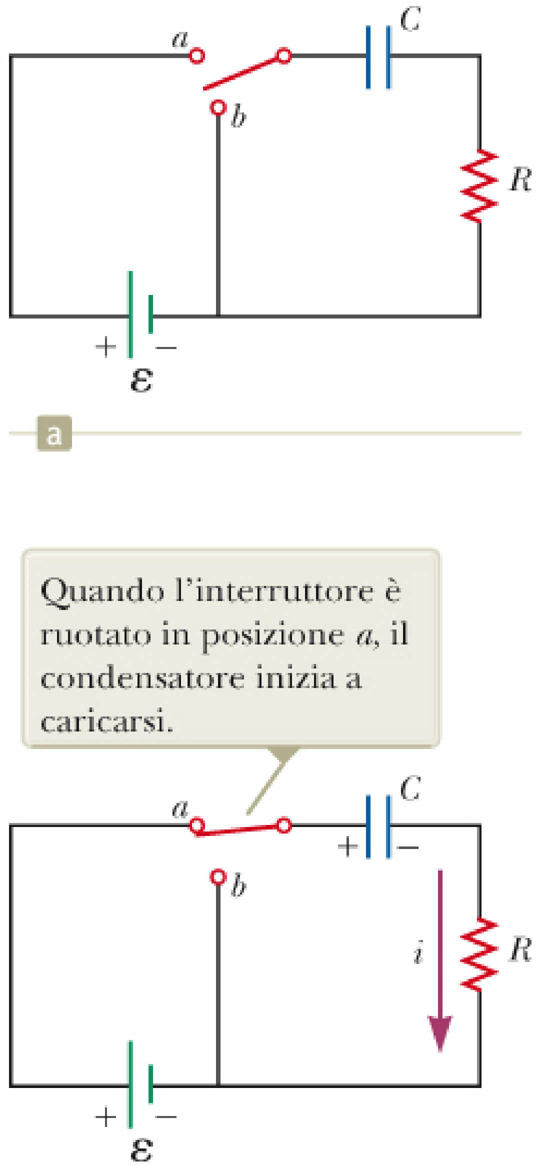
$$\varepsilon - \frac{q}{C} - iR = 0 \Rightarrow i = \frac{\varepsilon}{R} - \frac{q}{RC}$$

Sostituendo *i=dq/dt*, l'eq diventa

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} - \frac{q}{RC}$$

Per determinare un'espressione per *q*, modifichiamo l'equazione precedente, riscrivendo in altro modo i termini a destra:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{C\varepsilon}{RC} - \frac{q}{RC} = -\frac{q - C\epsilon}{RC}$$



Moltiplicando poi per *dt* e dividendo per *q-C*ε, otteniamo

$$\frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\frac{1}{RC}dt$$

Integrando questa espressione e ricordando che *q=0* per *t=0* si ricava

$$\int_0^q \frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\frac{1}{RC}\int_0^t dt \qquad ln\left(\frac{q - C\varepsilon}{-C\varepsilon}\right) = -\frac{t}{RC}$$

Dalla definizione di logaritmo naturale, possiamo riscrivere l'espressione precedente come

$$q(t) = C\varepsilon\left(1 - e^{-t/RC}\right) = Q_{max}\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

dove *e* è la base del logaritmo naturale ed p stata utilizzata la relazione dell'eq. L'espressione della corrente che sta caricando il condensatore si ricava derivando rispetto al tempo l'eq.. Usando la relazione *i=dq/dt* si ha

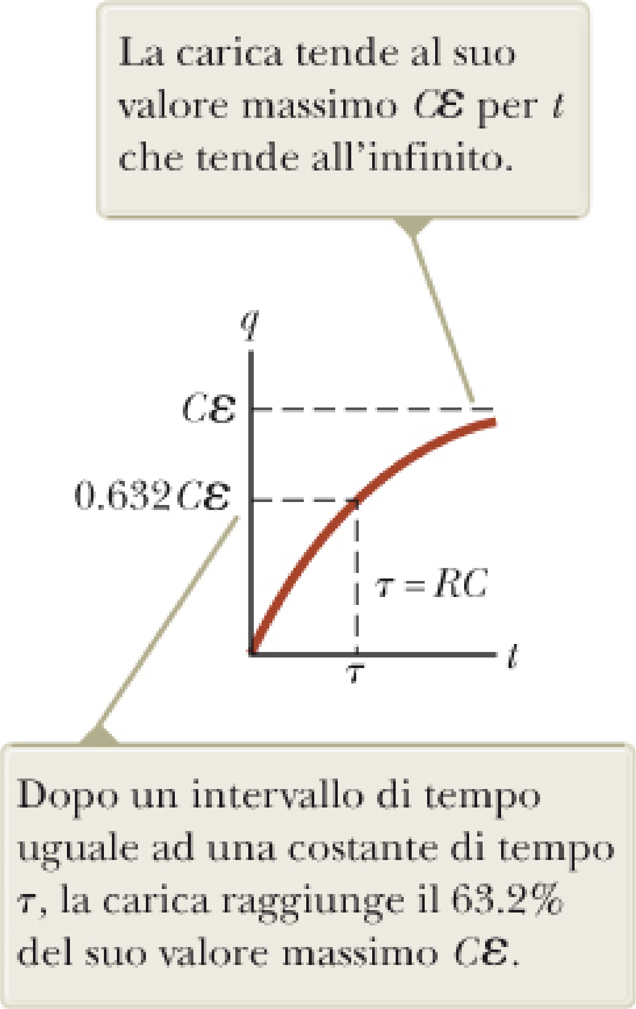
$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R}e^{-t/RC}$$

Carica condensatore

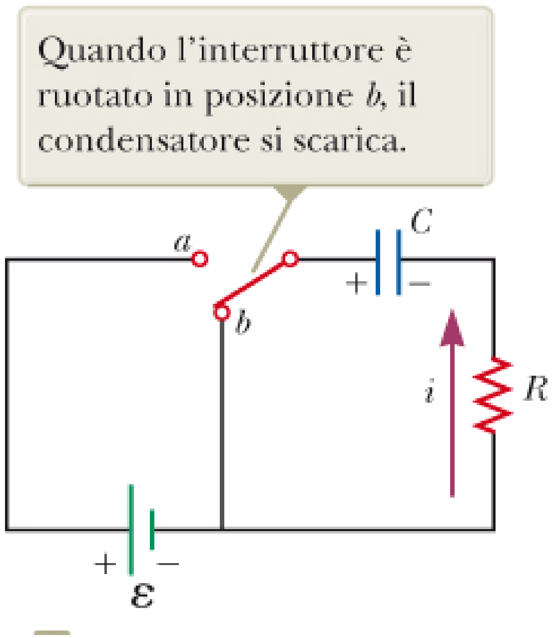
La quantità *RC* che appare negli esponenti delle equazioni è detta ***costante di tempo*** τ del circuito

$$\tau = RC$$

La costante di tempo è l'intervallo di tempo che la corrente impiega perché il suo valore diventi 1/e del suo valore iniziale.



Immaginiamo di aver caricato completamente il condensatore. Ai capi del condensatore esiste una differenza di potenziale Q_i/C, mente ai capi del resistore c'è una differenza di potenziale nulla in quanto $i=0$. Quando nell'istante $t=0$ l'interruttore viene ruotato in posizione b, il condensatore inizia a scaricarsi attraverso il resistore. In un istante generico t durante la scarica, la corrente nel circuito è i e la carica sul condensatore è q.



$$-\frac{q}{C} - iR = 0$$

Se in questa espressione sostituiamo $i=dq/dt$, otteniamo

$$-R\frac{dq}{dt} = \frac{q}{C} \qquad \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC}dt$$

Integrando questa equazione, sapendo che per $t=0$ $q=Q_i$, si ha

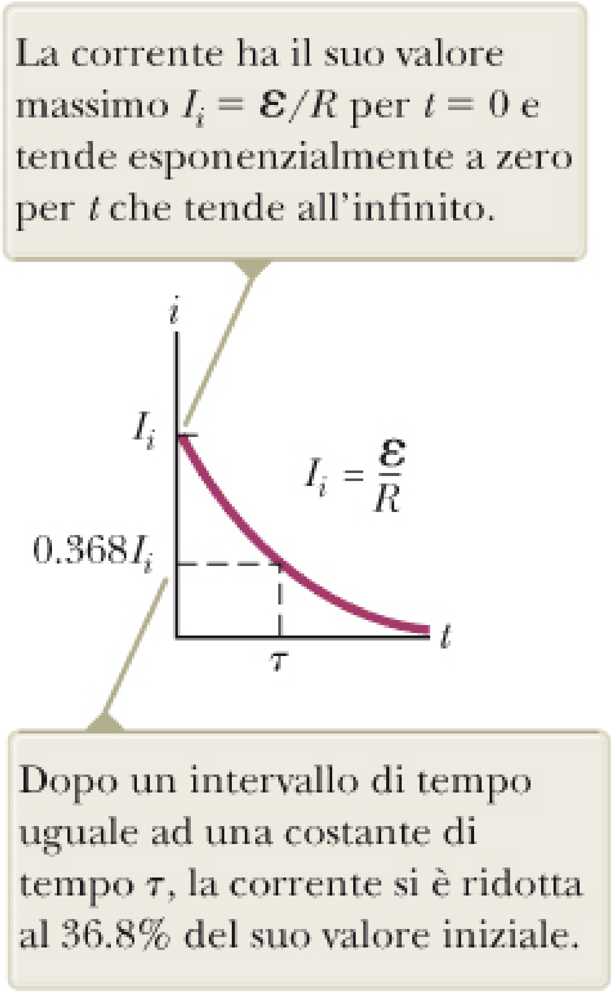
$$\int_Q^q \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC}\int_0^t dt \Rightarrow ln\left(\frac{q}{Q_i}\right) = -\frac{t}{RC} \Rightarrow q(t) = Q_i e^{-t/RC}$$

Scarica condensatore

Derivando rispetto al tempo, otteniamo la corrente istantanea in funzione del tempo:

$$i(t) = -\frac{Q_i}{RC} e^{-t/RC}$$

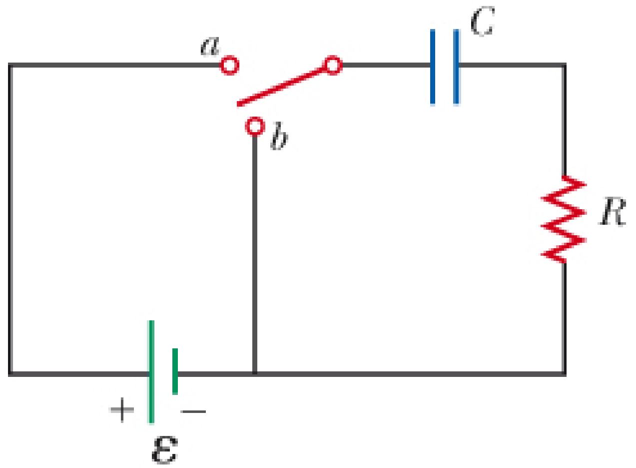
dove $Q_i/RC = I_i$ è il valore iniziale della corrente. Il segno meno indica che durante la scarica la direzione della corrente è opposta alla direzione che la corrente aveva quando il condensatore si stava caricando.



Esercizio

Come mostrato in fig. un condensatore scarico e un resistore sono collegati in serie ad una batteria. Se ε = *12.0V, C = 5.00 μF* e *R = 8.00 x 10⁵ Ω*. Quando l'interruttore viene ruotato in posizione *a*, si trovino la costante di tempo del circuito, la massima carica sul condensatore, la corrente massima nel circuito, la carica e la corrente in funzione del tempo.

$$\tau = RC = (8 \times 10^5 \Omega)(5 \times 10^{-6} F) = 4\ s$$



$$Q_{max} = C\varepsilon = (5\ \mu F)(12\ V) = 6\ \mu C$$

$$I_i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{12\ V}{8 \times 10^5\ \Omega} = 15\ \mu A$$

$$q(t) = 60\left(1 - e^{-t/4}\right)$$

$$i(t) = 15e^{-t/4}$$

Idee chiave

- Un generatore di *f.e.m.* compie lavoro sulle cariche per mantenere una differenza di potenziale tra i suoi terminali di uscita.
- Un generatore di *f.e.m.* ideale è privo di resistenze interne. La differenza di potenziale ai suoi capi è in questo caso pari alla *f.e.m.*
- Un generatore di *f.e.m.* reale presenta al suo interno delle resistenze. La differenza di potenziale ai suoi capi è uguale alla *f.e.m.* solo quando la corrente è nulla.
- La variazione di potenziale attraverso una resistenza R nel verso della corrente è $-iR$; nel verso opposto è iR (regola della resistenza).
- La variazione di potenziale attraverso un generatore di *f.e.m.* ideale nel verso della *f.e.m.* è $+\mathcal{E}$ nel verso posto è $-\mathcal{E}$ (regola della *f.e.m.*).

Idee chiave

- Il principio di conservazione dell'energia conduce alla legge delle maglie: la somma algebrica delle differenze di potenziale ai capi di tutti gli elementi incontrati nel percorrere una maglia intera è nulla.
- Il principio di conservazione della carica conduce alla legge dei nodi: la somma delle correnti che entrano in un modo deve essere uguale alla somma delle correnti che non escono
- Quando una batteria reale di *f.e.m.* e resistenza interna *r* compie lavoro sui portatori di carica che danno luogo a una corrente i attraverso la batteria caratterizzata da una differenza di potenziale V ai suoi morsetti, la potenza associata ai portatori di carica è $P=iV$
- la potenza P_r dissipata energia termica all'interno della batteria è $P_r = i^2 r$
- la potenza P_{fem} sottratta l'energia chimica della batteria è $P_{fem} = i\,\mathcal{E}$
- quando più resistenze sono collegate in serie tra loro, sono tutte attraversate da una medesima corrente. la resistenza equivalente che può sostituire la combinazione di resistenze in serie è

$$R_{eq} = \sum_{j=1}^{n} R_j$$