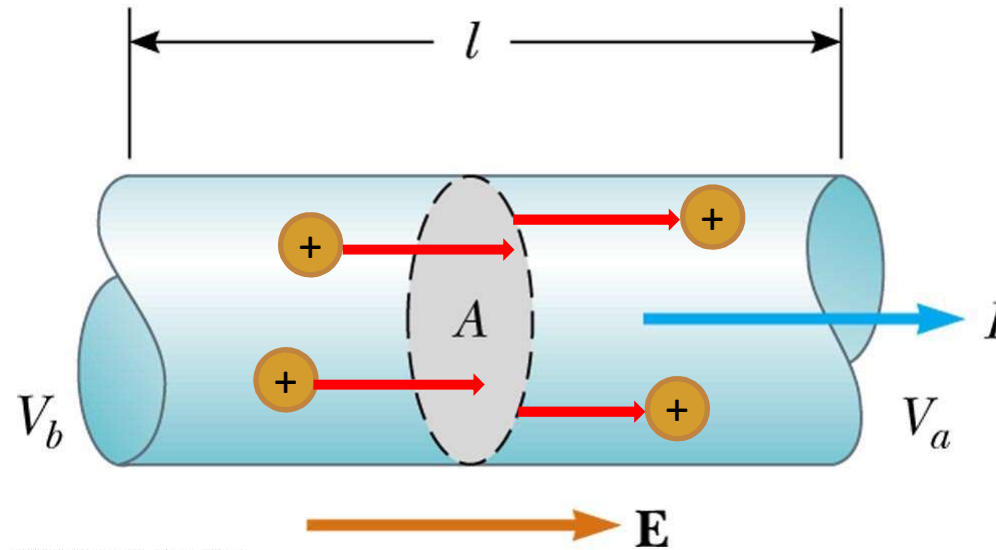


Corrente elettrica



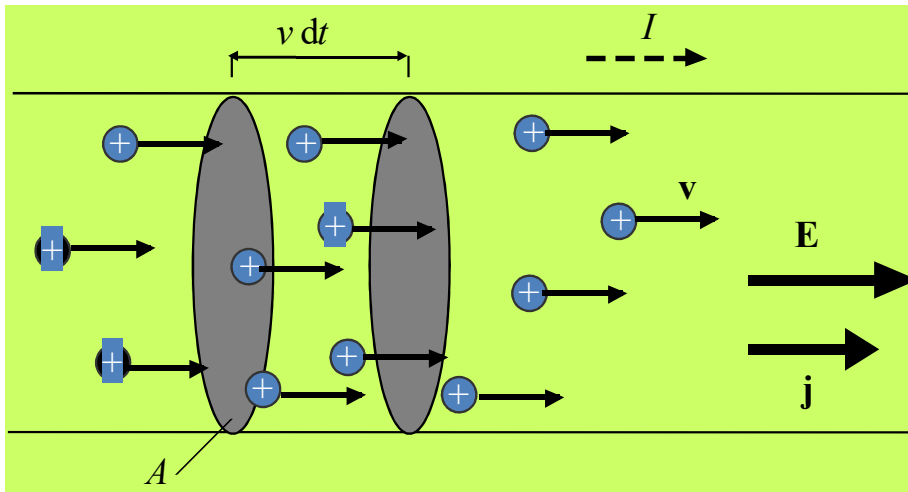
© 2003 Thomson - Brooks Cole

Se abbiamo delle cariche sottoposte ad un campo elettrico queste si sposteranno spinte dalla forza elettrica

Un flusso netto di cariche che attraversa una certa sezione viene definito corrente elettrica

Corrente elettrica

In un istante dt quanti portatori attraversano una sezione A ?
immaginiamo di avere n densità volumetrica di cariche. In un tempo pari a dt tutte le cariche contenute in un volume pari a $A v dt$ attraverseranno la sezione posta alla fine del volume.



$$N = n v A dt$$

Quanta carica portano?

$$dQ = qN = q n v A dt$$

Definiamo la corrente

$$I \triangleq \frac{dQ}{dt} = q n v A$$

Misura in Ampère
[C/s]

La corrente è dunque definita come la carica che attraversa una sezione A nell'unità di tempo

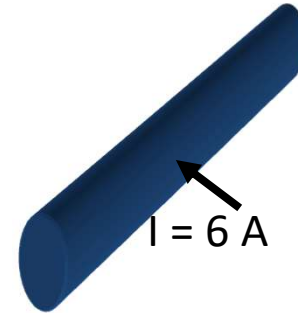
Esempio 1. la corrente in un filo è 6 A. Quanti elettroni attraversano la sezione di un filo di sezione circolare di diametro 2mm in un tempo pari a 3 s e con quale velocità?

Consideriamo il moto delle particelle rettilineo e uniforme

$$I = \frac{q}{t}; \quad q = It$$



$$q = (6 \text{ A})(3 \text{ s}) = 18 \text{ C}$$



Ricordiamo che : $1 \text{ e}^- = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, dunque:

$$18 \text{ C} = (18 \text{ C}) \left(\frac{1 \text{ e}^-}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \right) = 1,125 \times 10^{20} \text{ electrons}$$

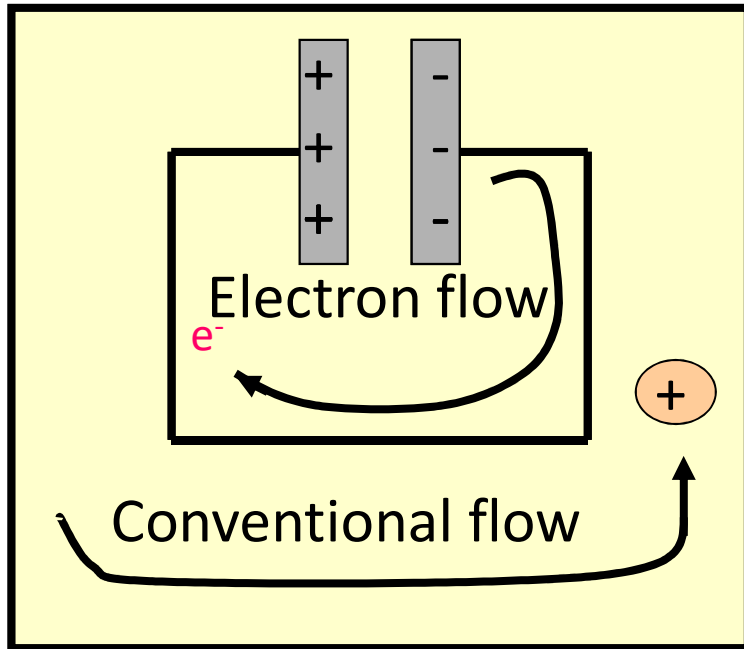
Per calcolare la velocità abbiamo bisogno di sapere la densità volumetrica degli elettroni.

Per il rame : $n = 8.5 \cdot 10^{28} \text{ elettroni/m}^3$

$$v = \frac{I}{enA} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Direzione della corrente

Consideriamo un condensatore carico con $Q = CV$ che viene fatto scaricare



Flusso degli elettroni : La direzione di e^- va dal polo negativo al polo positivo del condensatore come indicato nella figura

Direzione della corrente : La direzione di cariche positive dal polo positivo al polo negativo avrebbe lo stesso effetto.

La direzione della corrente è per convenzione quella delle cariche positive

Densità di corrente elettrica

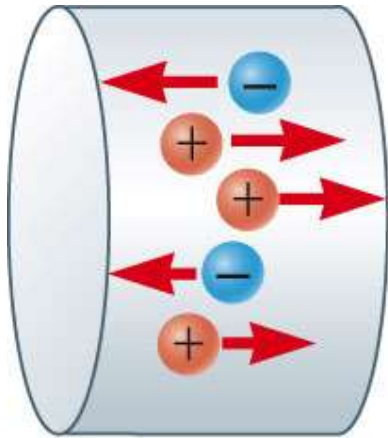
Viene definito la densità di corrente come quel vettore di ampiezza pari alla corrente per unità di superficie, e direzione uguale alla direzione della velocità delle cariche positive

Densità di corrente [A]/[m²] $\vec{J} \cdot \hat{n} = \frac{dI}{dS}$ Con n normale alla superficie S

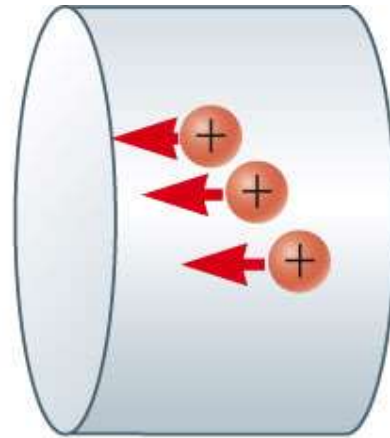
E' possibile dunque vedere la corrente come il flusso della densità di corrente attraverso una superficie

$$I = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

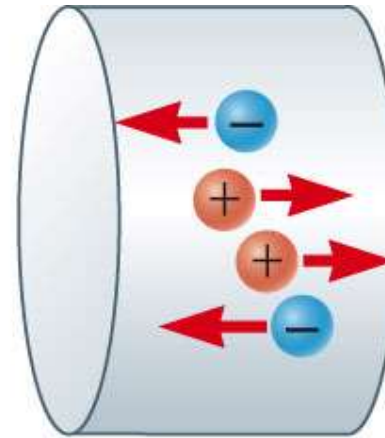
Ordinare l'ampiezza delle 4 correnti dalla piu' piccola alla piu grande



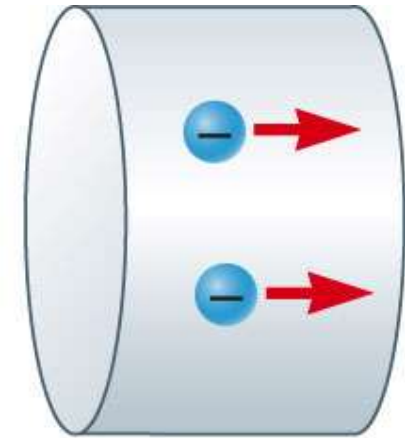
(a)



(b)



(c)



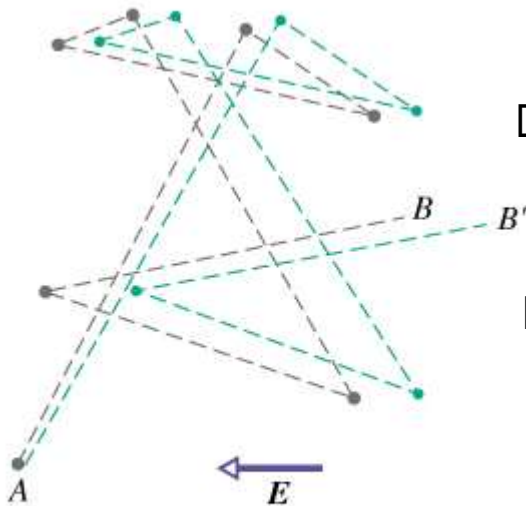
(d)

© Brooks/Cole, Cengage Learning

- A) d a c b
- B) a c b d
- C) c a b d
- D) d b c a
- E) a b c d

Corrente elettrica in un conduttore

- In un buon conduttore anche a temperatura ambiente una notevole quantità di elettroni è disponibile per il fenomeno della conduzione
 - Si muovono caoticamente (a causa degli urti con le particelle ferme) a velocità grandi (ordine 10^6 m/s), ma data una sezione, statisticamente tanti elettroni entrano quanti escono, ed il flusso medio di carica è nullo
 - Se si applica un campo elettrico, il loro moto caotico trasla lentamente, in direzione opposta al campo, così da aversi un flusso netto di carica.
 - Ogni particella è accelerata dalla forza elettrica,



$$\vec{a} = e \frac{\vec{E}}{m}$$

- a causa degli urti la sua velocità non cresce indefinitamente. La velocità netta del flusso di elettroni attraverso una sezione perpendicolare al campo è detta velocità di drift

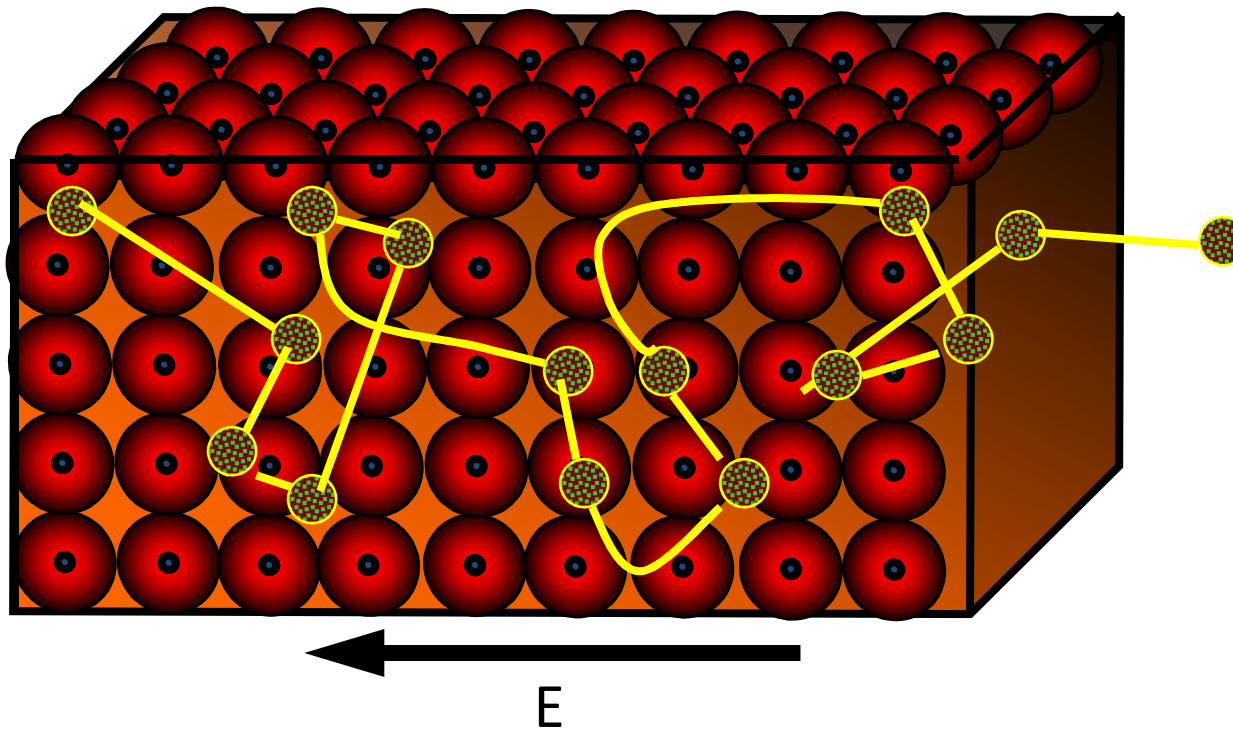
$$\vec{v}_d = \mu_e \vec{E} \quad \mu_e = \text{mobilità}$$

[http://lrrpublic.cli.det.nsw.edu.au/lrrSecure/Sites/Web/physics_explorer/physics/lo/superc 03/applets/path of electron/path of electron.htm](http://lrrpublic.cli.det.nsw.edu.au/lrrSecure/Sites/Web/physics_explorer/physics/lo/superc%2003/applets/path%20of%20electron/path%20of%20electron.htm)

[http://www.materials.ac.uk/elearning/matter/Electrons in Crystals/Conduction/thermal-motion-and-drift-velocity.html](http://www.materials.ac.uk/elearning/matter/Electrons%20in%20Crystals/Conduction/thermal-motion-and-drift-velocity.html)

Resistenza

La presenza di altre particelle all'interno di un conduttore fa perdere agli elettroni parte dell'energia cinetica fornita dal campo elettrico, questo fenomeno microscopico viene rappresentato a livello macroscopico come la Resistenza

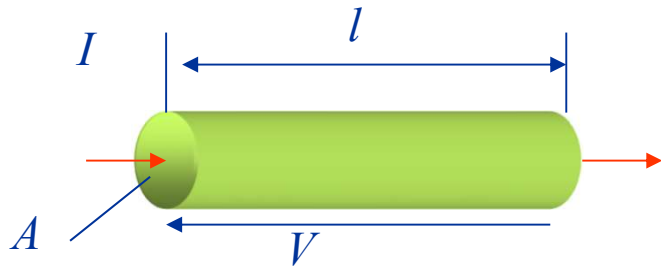


Legge di Ohm

□ Inserendo nella definizione di J il valore della velocità di deriva:

$$\vec{J} = qn\vec{v}_d = qn\mu_e\vec{E} \Rightarrow \vec{J} = \sigma\vec{E} \quad \sigma = qn\mu_e \quad \begin{array}{l} \text{Conducibilità:} \\ \text{Siemens/metro [S/m]} \end{array}$$

oppure $\Rightarrow \vec{E} = \rho\vec{J}$ $\rho = \frac{1}{\sigma}$ Resistività: Ohm metro [Ω m]



□ Applichiamo una ddp V ad un tratto di conduttore: con un flusso di corrente uniforme, E e J saranno uniformi:

$$\Rightarrow I = JA = \sigma EA = \sigma A \frac{V}{l} \quad \Rightarrow V = \frac{\rho l}{A} I = RI$$

Legge di Ohm

Prima legge di Ohm

Se si applica una d.d.p. ai capi di un conduttore metallico la corrente che vi scorre è direttamente proporzionale alla tensione



$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{In forma puntuale}$$

$$V = RI \quad \text{In forma integrale}$$

Unità di misura R nel sistema **SI**: **ohm= volt/ampère (Ω)**

Unità di misura G [1/R] nel sistema **SI**: **siemens= ampère/volt (S)**

(1826, George Simon Ohm)

Seconda legge di Ohm

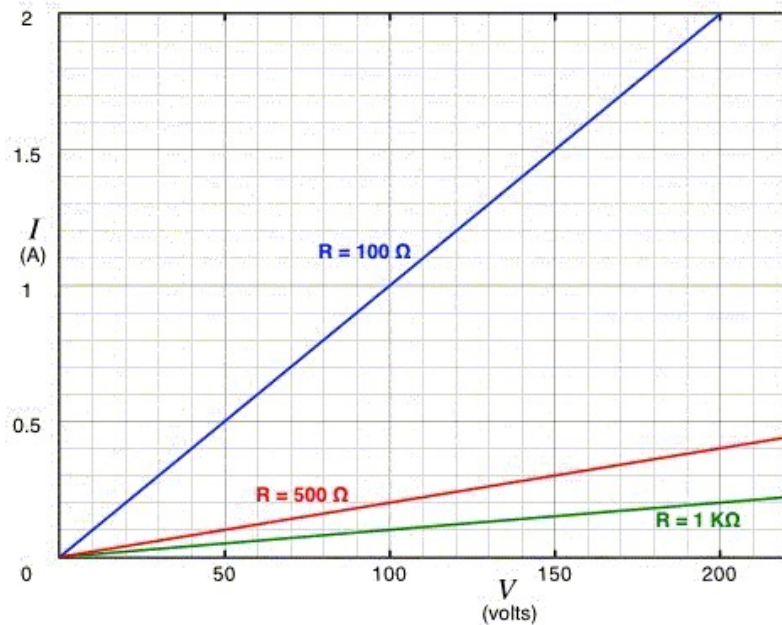
La resistenza di un conduttore metallico di sezione A e lunghezza l è data da:

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

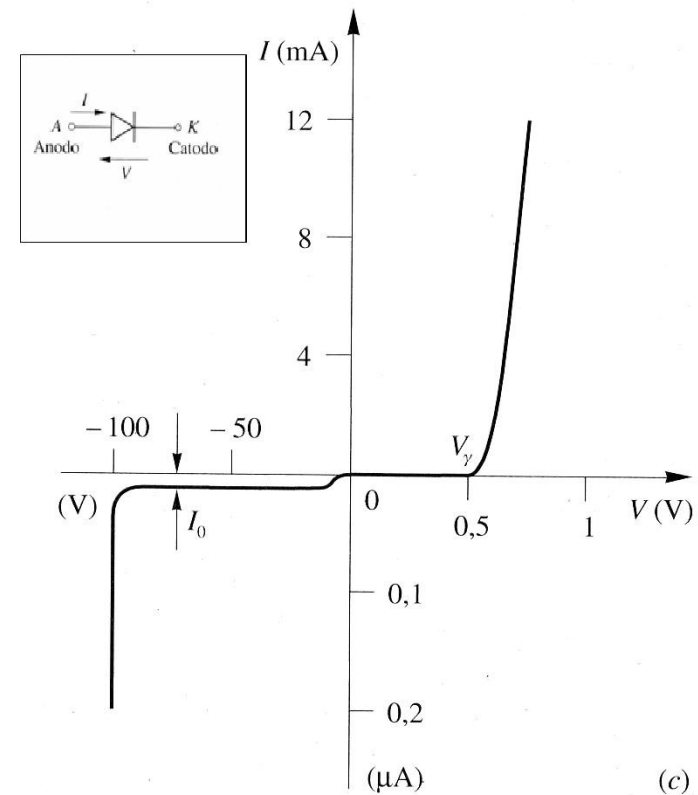
Legge di Ohm

Attenzione non tutti i conduttori seguono la legge di Ohm. In alcuni casi la resistenza (che è sempre possibile definire) non è una costante ma dipende dalla tensione

Conduttori non ohmici



Conduttori ohmici



(c)

Resistività

La resistività ρ si misura in $\Omega \cdot m$ e dipende dalla temperatura. Per $T=300 \text{ }^\circ K$

conduttori

semiconduttori

isolanti

Materiale	$\rho \text{ (}\Omega \cdot m\text{)}$
Argento	$1.5 \cdot 10^{-8}$
Rame	$1.7 \cdot 10^{-8}$
Alluminio	$2.6 \cdot 10^{-8}$
Sangue	0.2
Germanio	0.6
Silicio	$2.3 \cdot 10^3$
Vetro	10^{14}

Resistività

La resistività e la conducibilità sono in generale funzioni della temperatura

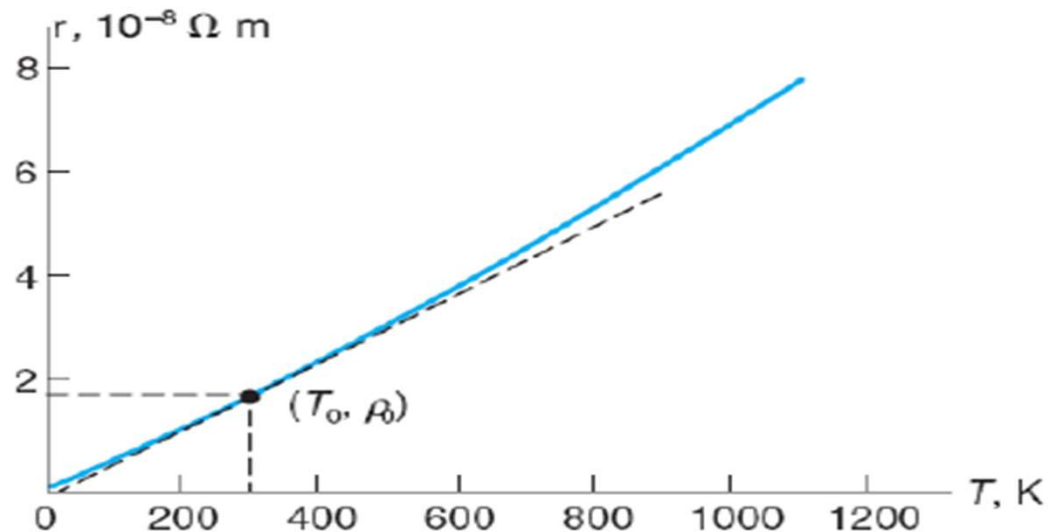
Per variazioni di temperatura di ampiezza limitata (dell'ordine delle decine di gradi) la dipendenza può essere considerata praticamente lineare

$$\rho(\theta) = \rho_0(1 + \alpha\theta)$$

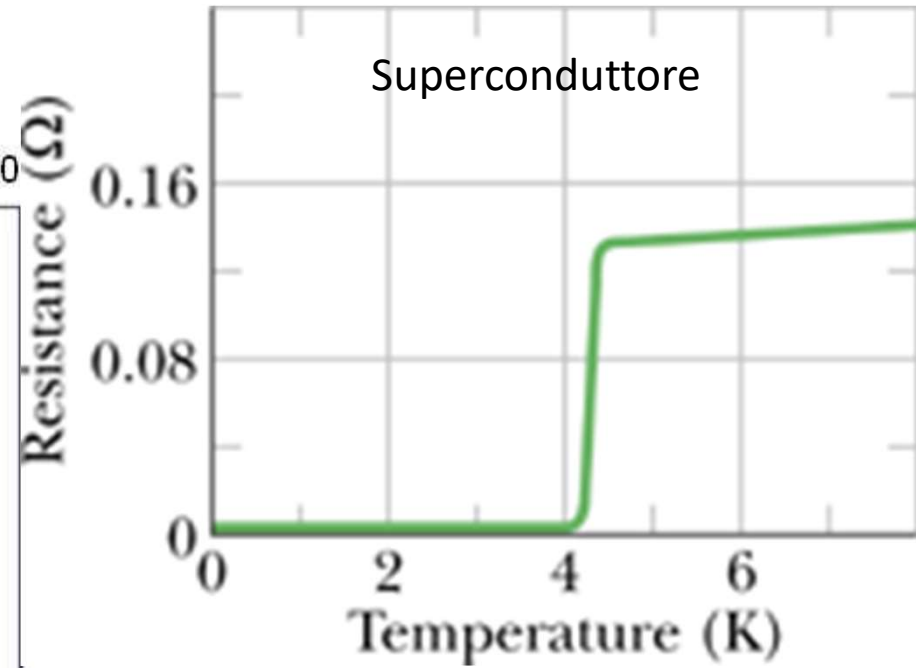
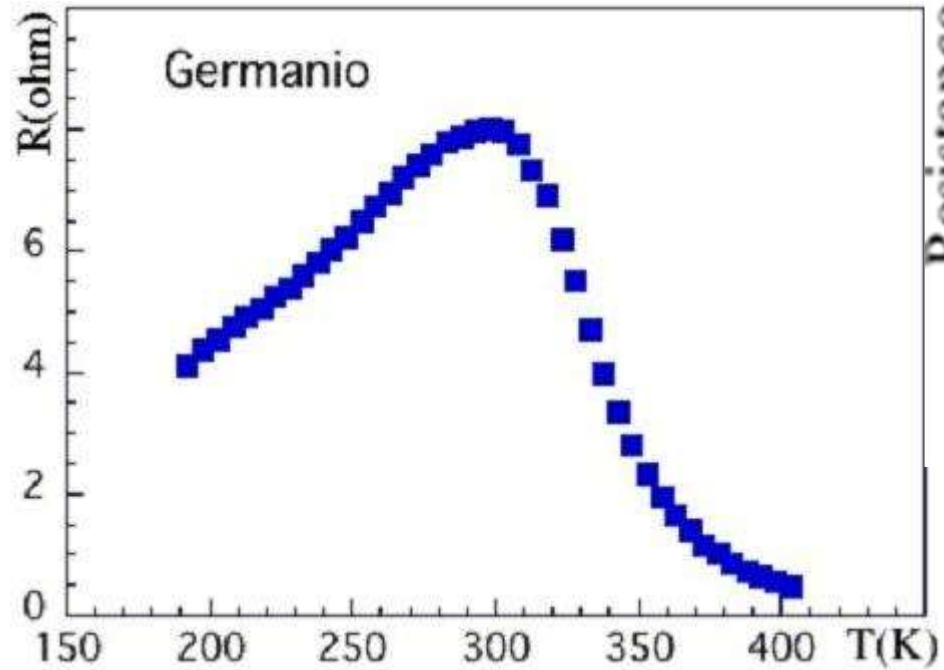
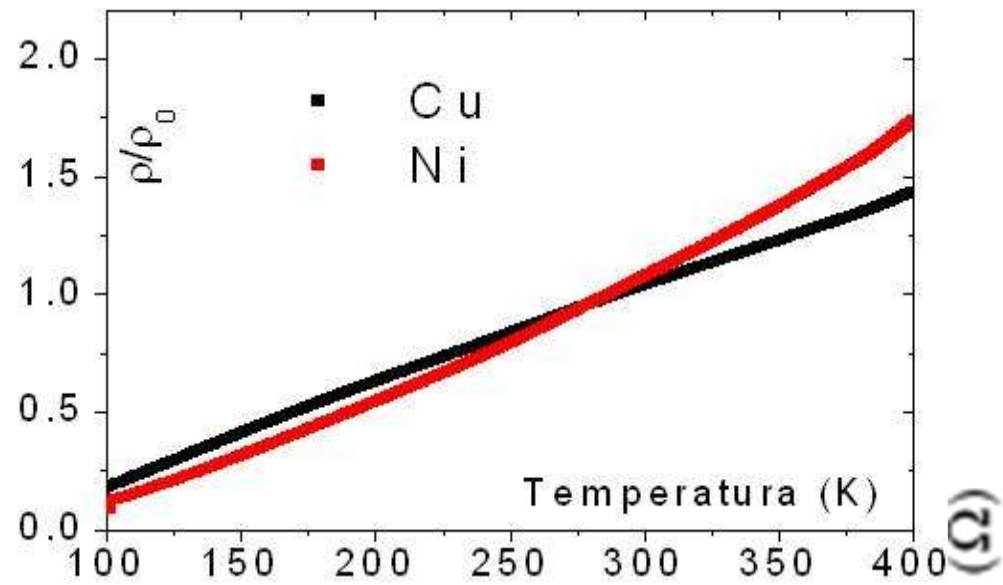
ρ_0 = resistività valutata alla temperatura di riferimento T_0

$\theta = T - T_0$ = variazione di temperatura rispetto a T_0

α = coefficiente di temperatura



Resistività

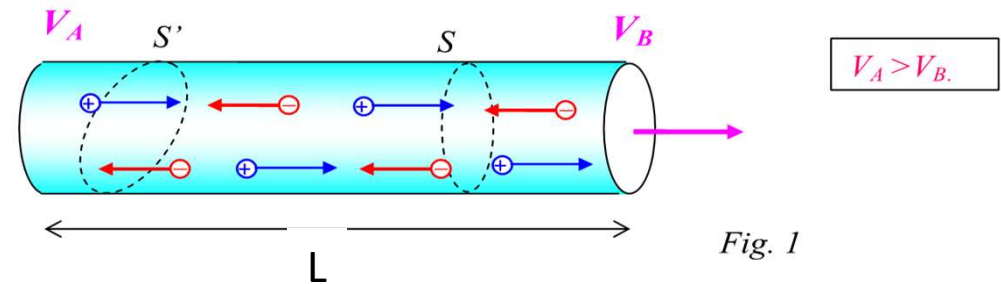


Potenza elettrica – Legge di Joule

Applicata una ddp V scorre una corrente I

Il campo, nello spostare la carica dq , compie il lavoro

L'energia necessaria [J] per muovere una carica infinitesima all'interno di un conduttore reale dotato di una resistenza R per un tratto infinitesimo di vale:

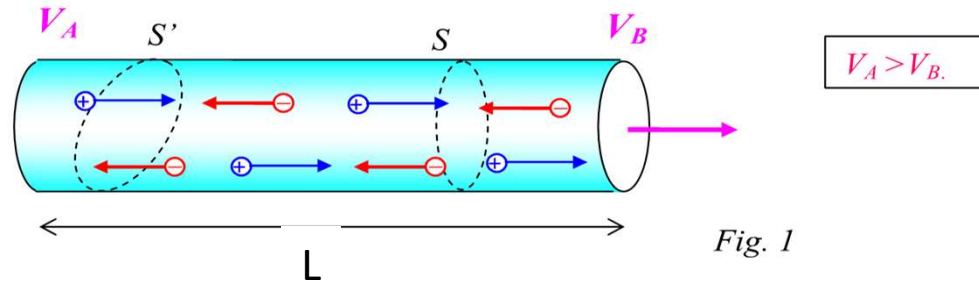


$$dU_E = \vec{F} \cdot d\vec{l} = dq\vec{E} \cdot d\vec{l} = \rho_v dV \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

La potenza necessaria [W] è pari alla variazione temporale dell'energia (legge di Joule puntuale):

$$dP = \frac{dU_E}{dt} = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{l}}{dt} = \frac{dq\vec{E} \cdot d\vec{l}}{dt} = \rho_v dV \vec{E} \cdot \frac{d\vec{l}}{dt} = \rho_v dV \vec{E} \cdot \vec{v} = \vec{E} \cdot (\rho_v \vec{v}) dV = \vec{E} \cdot \vec{J} dV$$

Potenza elettrica dissipata in un conduttore reale



In un volume V otteniamo la Legge di Joule integrale:

$$P = \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = \int_V \frac{\vec{J}}{\sigma} \cdot \vec{J} dV = \int_V \frac{|\vec{J}|^2}{\sigma} dV = \int_V \sigma |\vec{E}|^2 dV \quad [W]$$

$$P = \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV = \int_V \sigma |\vec{E}|^2 dV = \int_V \sigma \left(\frac{J}{\sigma} \right)^2 dV = \frac{1}{\sigma} JSJL = \frac{1}{\sigma} I \sigma E_z L = IV = RI^2 \quad [W]$$

Conservazione della carica

- Se in un volume V la carica diminuisce dobbiamo dedurre che c'è un flusso di cariche (corrente) che esce da tale volume
- quindi

$$\oint_S \vec{\mathbf{J}} \cdot \vec{\mathbf{n}} ds = - \frac{dQ}{dt}$$

- Se applichiamo tale principio ad un volume infinitesimo, in modo analogo con quanto facemmo per la legge di Gauss, otteniamo la legge di conservazione di carica in forma differenziale

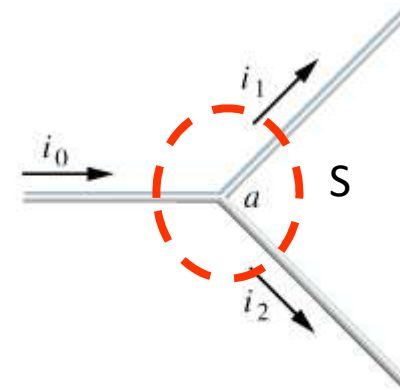
$$\nabla \cdot \vec{\mathbf{J}} = - \frac{d\rho}{dt}$$

Conservazione della carica: 1a legge di Kirchhoff

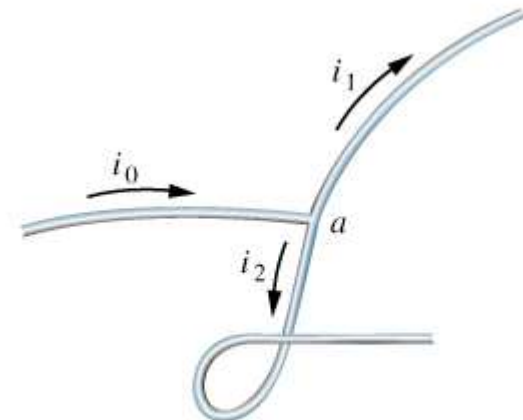
- Dato un insieme di conduttori che confluiscono in un nodo, ovvero un punto privo di fenomeni di accumulo di carica, il principio di conservazione della carica può essere riscritto convenientemente

$$\oiint_S \vec{\mathbf{J}} \cdot \vec{\mathbf{n}} ds = \sum_i I_i = -\frac{dQ}{dt} = 0$$

$$\sum_i I_i = 0$$



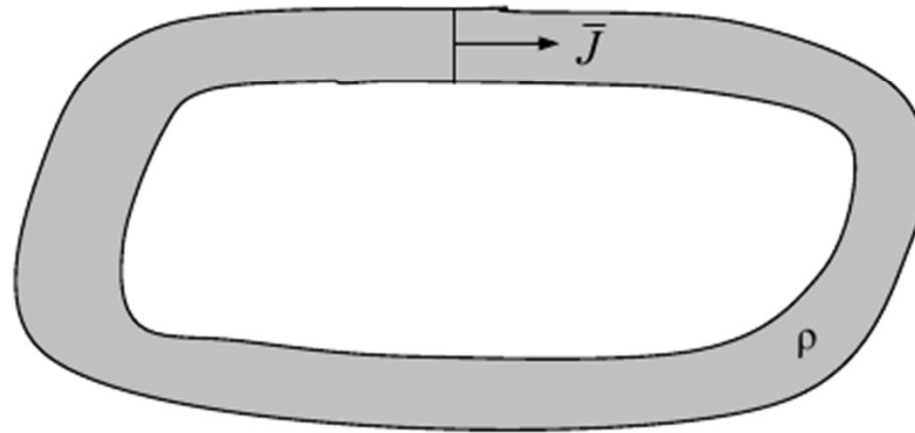
(a)



(b)

1.3.4. GENERATORE DI FORZA ELETTRIMOTRICE (F.E.M.)

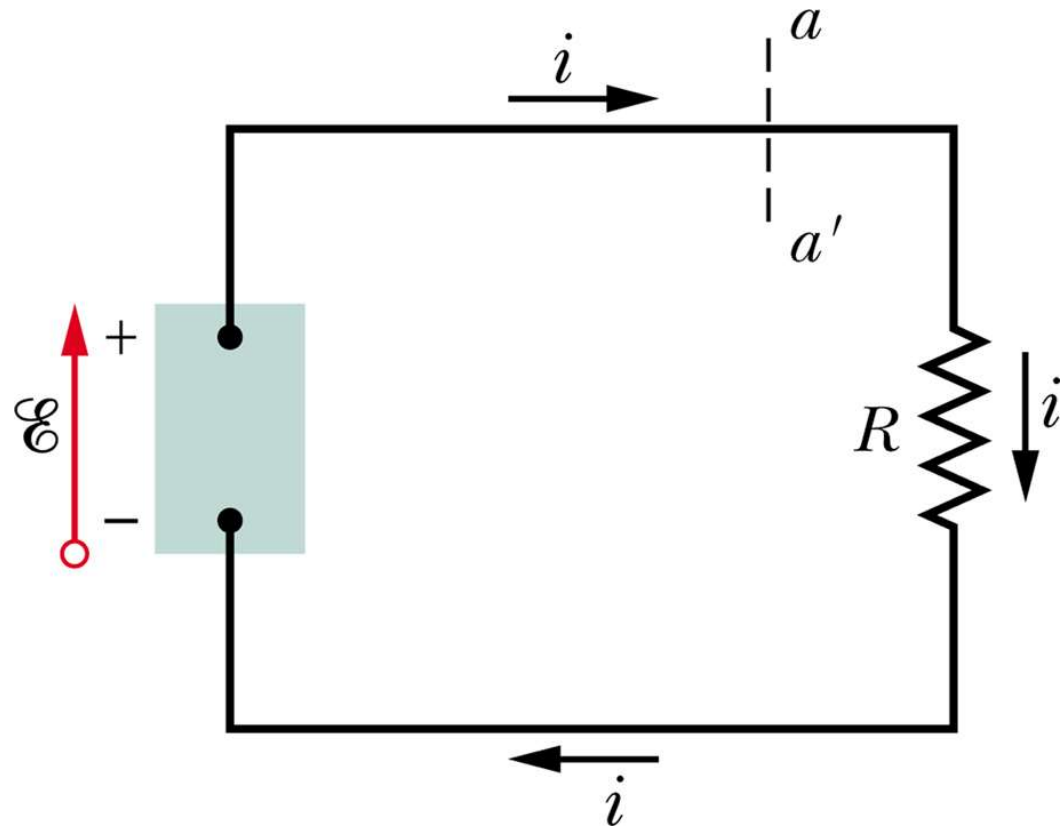
Si consideri il caso di una corrente stazionaria I entro un semplice circuito costituito da un conduttore, come descritto dalla figura sotto: le cariche elettriche vi circolano in maniera continua e permanente.



La corrente circolando dissipa energia in calore (effetto Joule)
Se la resistenza del conduttore non è nulla occorre un generatore elettrico che fornisca tale energia

Forza elettromotrice

Batteria: è una “pompa”
che spinge le cariche
contro le forze del campo
elettrico



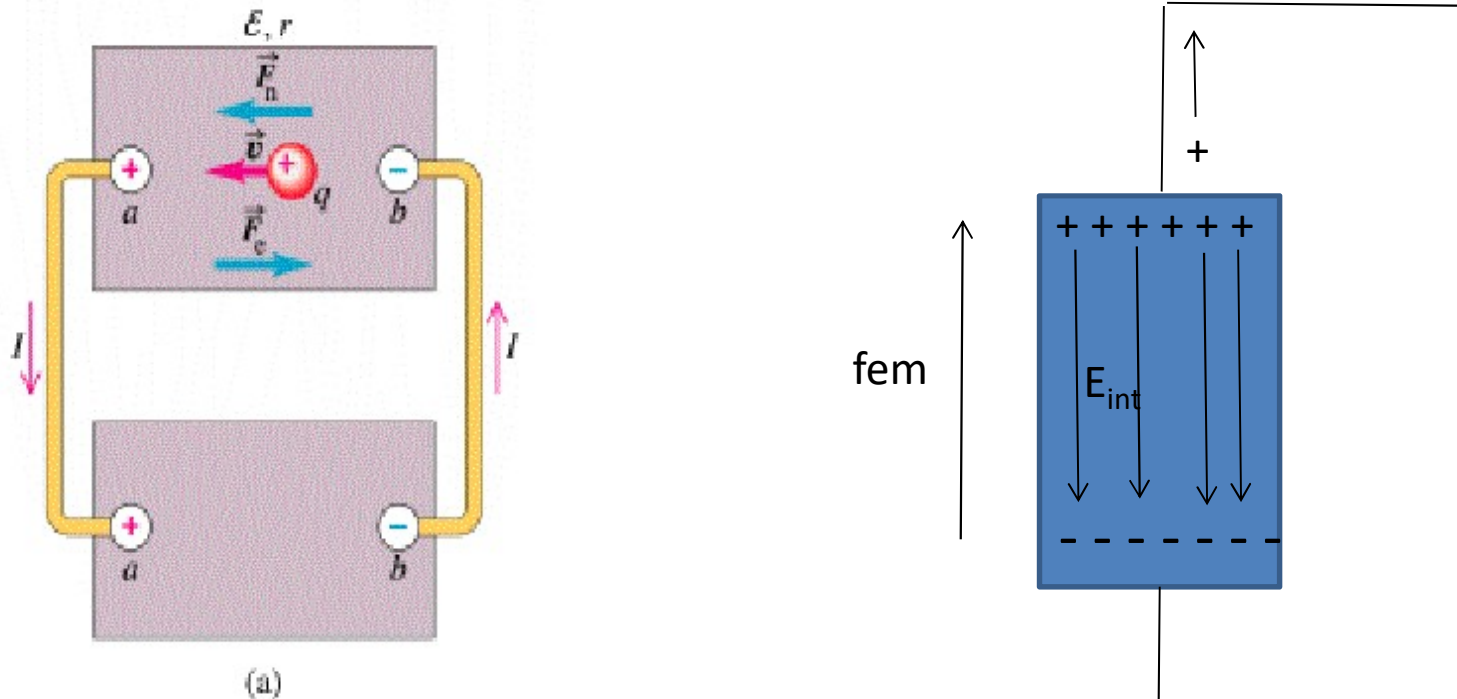
Ogni dispositivo in grado di aumentare l'energia potenziale di una carica che lo attraversa è detto sorgente di forza elettromotrice (fem).

La FEM si misura in Volt e spesso la si indica con la lettera \mathcal{E} .

Generatore elettrico

Le cariche elettriche positive vengono portate ad un potenziale positivo e acquistano energia che si trasforma in calore nei conduttori.

Le cariche non possono attraversare il generatore seguendo la direzione del campo E_{int} , per cui si richiuderanno verso il percorso esterno



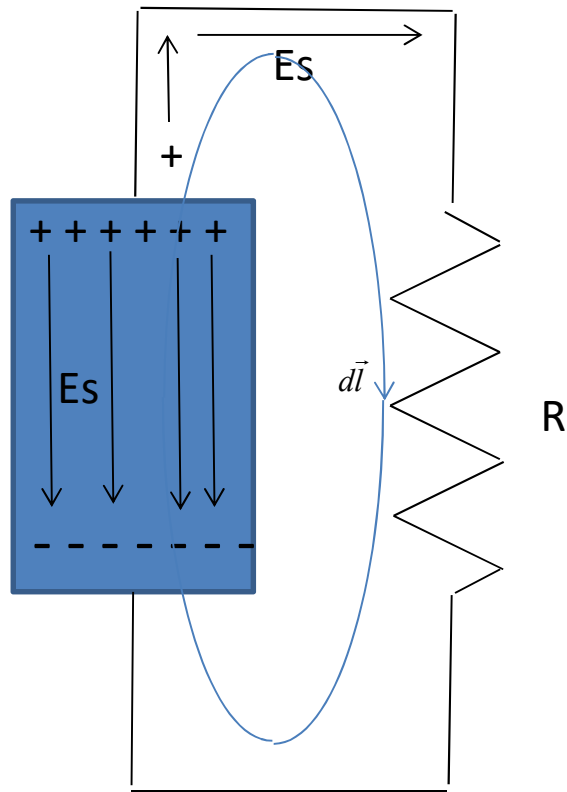
La differenza di potenziale che si crea all'interno del generatore è detta forza elettromotrice

[APPLET](http://phet.colorado.edu/en/simulation/battery-voltage): portatori in una batteria

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/battery-voltage>

Forza elettromotrice 1/3

Per permettere alla corrente di scorrere dentro al circuito abbiamo bisogno di un dispositivo che fornisca l'energia necessaria a compensare le dissipazioni. Le cariche dentro al circuito sono spinte da una forza che compie un lavoro positivo.



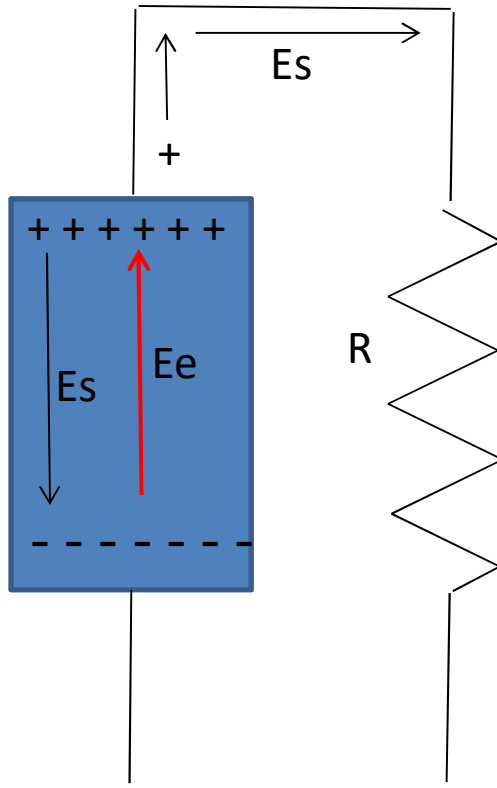
$$\oint_c \vec{F} \cdot d\vec{l} > 0$$

Nel circuito in figura esiste un campo elettrostatico E_s dovuto alle cariche accumulate ai capi del generatore. Data la conservatività del campo elettrostatico non può essere lui a fornire l'energia necessaria alle cariche per percorrere l'intero circuito .

$$\oint_c \vec{F}_{E_s} \cdot d\vec{l} = q \oint_c \vec{E}_s \cdot d\vec{l} = 0$$

Forza elettromotrice 2/3

Dovrà esistere dunque una forza NON conservativa che fornisce questa energia alle cariche. In generale questa forza può avere diverse origini: elettrica, meccanica chimica ecc. ma è sempre possibile vederla come una forza che crea un campo elettrico NON conservativo che permette alle cariche di muoversi dentro al generatore in direzione opposta al campo elettrostatico E_s . Questo campo NON conservativo lo chiamiamo campo elettromotore E_e . Se il generatore è scollegato al circuito e dunque la corrente NON circola nel circuito, il campo E_e dentro al generatore è uguale e opposto al campo E_s all'interno del generatore, mentre fuori è nullo.



$$L = \oint_c \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \oint_c (\vec{E}_s + \vec{E}_e) \cdot d\vec{l} =$$

$$q \oint_c \vec{E}_s \cdot d\vec{l} + q \oint_c \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = q \oint_c \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = q \int_{-}^{+} \vec{E}_e \cdot d\vec{l}$$

$$fem \triangleq \frac{L}{q} = \int_{-}^{+} \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = - \int_{-}^{+} \vec{E}_s \cdot d\vec{l} = V_{+} - V_{-}$$

Forza elettromotrice 3/3

La forza elettromotrice è dunque pari alla differenza di potenziale ai capi del generatore a morsetti aperti

Una definizione più generale della forza elettromotrice è:

$$fem \triangleq \frac{L}{q} = \oint_c \vec{E}_e \cdot d\vec{l}$$

In questo caso il campo NON conservativo che sostiene la corrente nel circuito è diversa da zero ovunque nel circuito

Generatore elettrico

Un generatore

- Può trasformare l'energia chimica ottenuta da reazioni chimiche fra opportuni componenti (piombo, ossido di piombo in una soluzione diluita di acido solforico). Ad esempio le batterie per auto e per apparecchi portatili
- Può sfruttare l'effetto fotovoltaico: pannelli di semiconduttori che convertono l'energia luminosa
- Può convertire l'energia derivante dalle interazioni elettrodinamiche fra correnti o fra campo magnetico e correnti. (ad esempio le grandi centrali elettriche, i generatori eolici, l'alternatore nell'auto)

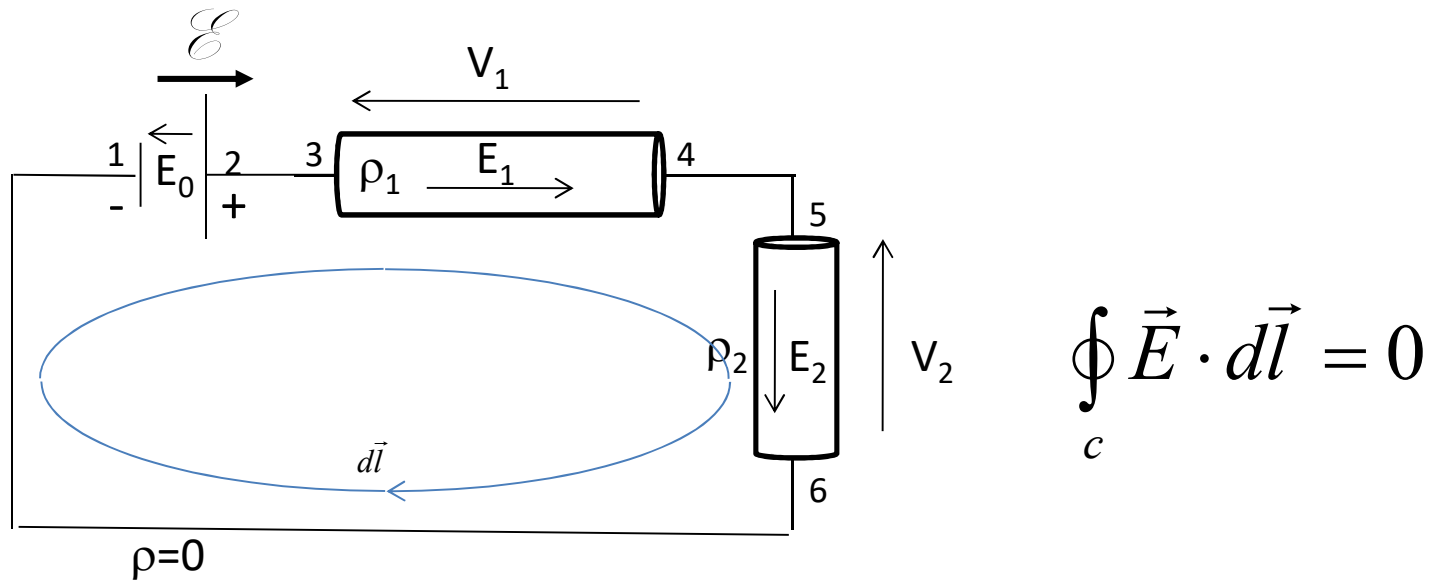
Circuito elettrico

Un circuito elettrico è un percorso chiuso su cui scorre una corrente elettrica

Legge di Kirchhoff ai nodi: La somma delle correnti che entrano in un nodo deve essere eguale alla somma delle correnti che escono

Legge di Kirchhoff alle maglie: La somma algebrica delle variazioni di potenziale elettrico lungo un percorso chiuso è zero.

Legge di Kirchhoff alle maglie: un esempio

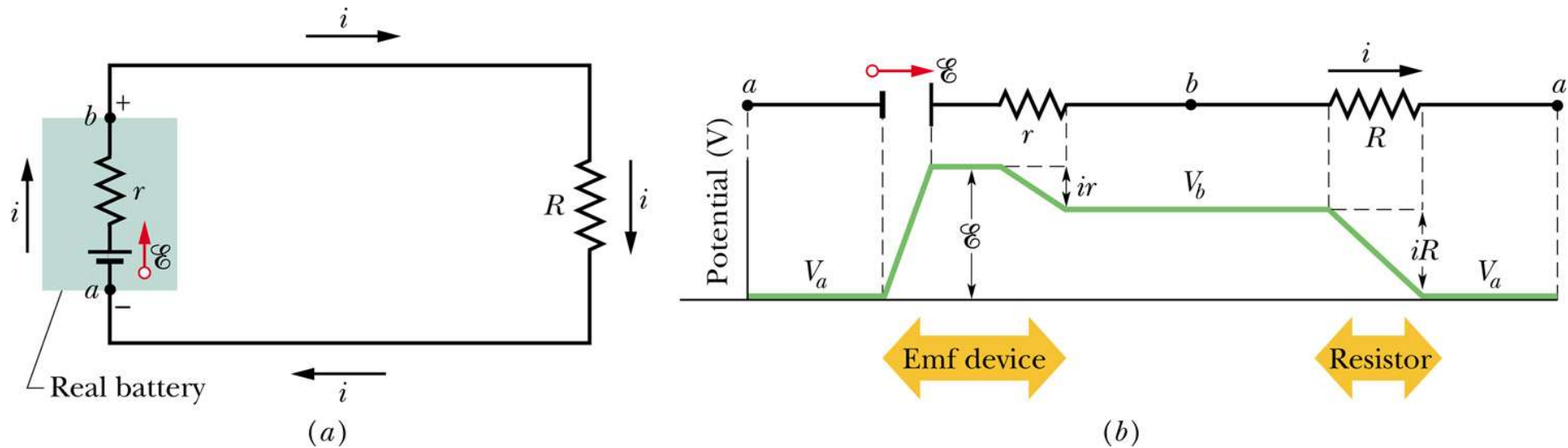


$$\int_1^2 \vec{E}_0 \cdot d\vec{l} + \int_3^4 \vec{E}_1 \cdot d\vec{l} + \int_5^6 \vec{E}_2 \cdot d\vec{l} = 0$$



$$-\mathcal{E} + V_1 + V_2 = 0 \quad \text{Legge di Kirchhoff alle maglie}$$

Resistenza interna



Un generatore non è mai un circuito ideale, ma ha una sua resistenza interna.
L'effettiva tensione di alimentazione del circuito è data da

$$\mathcal{E} - i r$$